

**Direction des bibliothèques**

**AVIS**

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

**NOTICE**

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

**Différents paramètres physiques exercés par le singe  
durant l'exploration tactile**

par  
Pascal Fortier-Poisson

Département de Physiologie  
Faculté de Médecine

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de maîtrise (M.Sc)  
en Sciences Neurologiques  
2-530-1-0

Janvier, 2008

©Pascal Fortier-Poisson, 2008



Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

**Différents paramètres physiques exercés par le singe  
durant l'exploration tactile**

présenté par :  
Pascal Fortier-Poisson

Sera évalué par un jury composé des personnes suivantes

Réjean Dubuc  
Président-rapporteur

Allan M. Smith  
Directeur de recherche

C. Elaine Chapman  
Membre du jury

## Résumé (français)

Cette étude a documenté les paramètres physiques de l'exploration tactile chez le singe lors de la recherche d'une cible surélevée sur quatre surfaces différentes. Les surfaces étaient de plastique sec ou lubrifié avec de l'huile et deux surfaces de papier sablé de grain #120 et #80. Les mouvements du doigt et les forces appliquées étaient constants entre les essais sur une échelle de plusieurs jours. Cette constance montre que la procédure exploratoire est un comportement contrôlé et reproductible. La force normale (de contact,  $F_N$ ) moyenne variait de 0,39N pour le papier sablé #80 à 0,62N pour le plastique lisse sec. La force tangentielle (parallèle à la surface,  $F_{tan}$ ) s'échelonnait de 0,30N pour le plastique huilé à 0,41N pour le papier sablé #80. Les forces normale et tangentielle moyennes ne présentent pas de relation monotone entre les quatre surfaces malgré que le coefficient de friction ( $\mu = F_{tan}/F_N$ ) augmente significativement de façon monotone ( $\mu = 0,53; 0,63; 0,77$  et  $1,07$ ). La même croissance régulière a été observée quant au taux de variation de la force tangentielle. La vitesse du doigt sur la surface était la plus petite (448 mm/sec) sur le plastique huilé et la plus rapide (923 mm/sec) sur le papier sablé #80. Cette vitesse n'est pas clairement corrélée avec le temps moyen d'exploration nécessaire pour trouver la cible, plus long pour le papier sablé #120 (2,0sec) et plus court (1,5sec) pour le plastique lisse sec. Ces résultats appuient l'hypothèse que le singe, comme l'humain, dispose d'une stratégie contrôlée et orientée pour l'exploration tactile variant selon la surface explorée.

**Mots clés :** Exploration tactile, toucher, doigt, peau, singe, propriétés de surface, force tangentielle.

## Abstract (English)

This study examined the physical parameters of a monkey performing a tactile exploration of 4 different surface topologies to find a raised target. The surfaces were smooth plastic lubricated with mineral oil, dry smooth plastic, and #120 and #80 sandpapers. The finger movements and applied forces were consistent from trial to trial over many days indicating that the exploratory procedures were dependable and reliable behaviours. Normal (i.e. contact) forces varied from 0.39 N for #80 sandpaper, to 0.62 N for the dry smooth plastic. Tangential forces ranged from 0.30 N for oiled plastic to 0.41 N for #80 sandpaper. The mean normal and tangential forces failed to show a simple monotonic relation across the four surfaces, but the coefficient of friction, ( $F_{\text{tan}}/F_n$ ) did increase significantly and monotonically ( $\mu = 0.53, 0.63, 0.77$  and  $1.07$ ). A similar monotonic relationship was observed for the rate of change in tangential force. The speed of finger movement was slowest (448 mm/s) for oiled plastic and fastest (923 mm/s) for #80 sandpaper, and did not appear to correlate with the mean time required to find the target which was greatest (2.0s) for #120 sandpaper, and least (1.5s) for dry smooth plastic. The results support the hypothesis that the monkeys, like human, use a controlled purposeful strategy for tactile exploration that varies with the surface substrate to be explored.

**Key words:** Tactile exploration, touch, finger, skin, monkey, surface properties, tangential force.

## Table des matières

Résumé (français).....	I
Abstract (English).....	II
Table des matières.....	III
Liste des tables .....	VI
Liste des figures.....	VII
Liste des abréviations.....	VIII
Remerciements.....	IX
INTRODUCTION.....	1
1.0 L'exploration tactile.....	1
2.0 Électrophysiologie des récepteurs.....	1
2.1 Stimulations simples.....	1
2.2 Parcours de surface.....	4
2.3 Angle de stimulation.....	7
3.0 Forces sur la peau.....	10
4.0 Trajectoire de l'information de la main à SI.....	11
5.0 Système nerveux central.....	12
5.1 Données générales.....	12
5.2 Préhension et coefficient de friction.....	13
5.3 Les aires somatosensorielles (particulièrement 3b).....	14
5.4 Textures.....	14
5.5 Influences cortico-corticales.....	16
6.0 Hypothèses (Stratégie d'exploration).....	17

MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	19
1.0 Tâche.....	19
1.1 Tâche générale.....	19
1.2 Tâche de base.....	19
1.3 Variations de la tâche.....	20
1.4 Conditionnement.....	21
1.5 Durée d'entraînement.....	22
2.0 Instruments d'acquisition.....	23
2.1 Appareils.....	23
2.2 Acquisition.....	24
3.0 Données.....	24
4.0 Analyse.....	26
RÉSULTATS.....	28
1.0 Stratégie d'exploration.....	28
2.0 Stratégie entre les différentes surfaces.....	30
2.1 Les forces normale et tangentielle.....	30
2.2 Variations de la force tangentielle.....	35
2.3 Coefficient de friction dynamique.....	36
2.4 Forces et frictions comparées.....	38
2.5 Coefficient de friction non constant.....	39
2.6 Temps d'exploration.....	40
2.7 La vitesse.....	40
3.0 Linéarité de la friction vs force normale.....	42

DISCUSSION.....	44
1.0 Stratégie d'exploration.....	44
1.1 Le singe comme modèle d'exploration tactile.....	44
1.2 Parcours général.....	46
1.3 Forces déployées.....	46
1.4 Friction.....	47
1. 5 Vitesse.....	48
2.0 Différences entre surfaces.....	48
2.1 Matériel utilisé pour les surfaces.....	48
2.2 Variation des forces.....	49
2.3 Saccharose et huile.....	51
2.4 Le cas papier sablé gros-grains.....	52
2.5 Corrélation $F_{tan}/F_n$ .....	52
2.6 Friction et $RMSdF_{tan}$ .....	53
2.7 Vibrations.....	54
2.8 Vitesse.....	56
3.0 Friction et Force Normale.....	57
4.0 Exploration tactile et visuelle.....	57
5.0 Conclusions.....	58
6.0 Futur.....	58
Bibliographie.....	60



## Liste des Tableaux

Tableau 1: Propriétés des réponses des quatre types de mécanorécepteurs.....	9
Tableau 2: Localisation et dimension des cibles.....	20
Tableau 3: Moyenne des valeurs efficaces de la première dérivée de la force tangentielle.....	36
Tableau 4: Vitesses et temps de parcours moyens pour chaque type de surface.....	39

## Liste des figures

## Liste des figures

Figure 1 : Carte des taux de décharge des SAI (en haut) et RAI (en bas) selon le déplacement de la surface.....	6
Figure 2 : Angles de stimulation et nomenclature des directions d'application de l'expérience de Birzniek et al. 2001.....	7
Figure 3: Surfaces utilisées durant l'entraînement et l'enregistrement de la tâche.....	18
Figure 4 : Appareil d'entraînement complet d'exploration tactile. Capteur de forces avec surface sur plateforme rotative.....	22
Figure 5: Exemple d'un essai sur surface de plastique lisse sec.....	25
Figure 6: Exemple de la stratégie de parcours du singe selon la surface.....	27
Figure 7: Distribution de tous les échantillons des forces normale et tangentielle, de la friction dynamique et de la vitesse durant l'exploration.....	29
Figure 9: Représentation de la distribution croisée des forces normale et tangentielle instantanées pour chacune des surfaces.....	32
Figure 8: Moyenne des forces déployées durant l'exploration selon la surface.....	31
Figure 10: Première dérivée de la force tangentielle ( $dF_{tan}$ ) instantanée durant un essai selon la surface.....	34
Figure 11: Coefficient de friction dynamique moyen selon les surfaces.....	36
Figure 12: Coefficient de friction instantané durant un essai selon la surface.....	37
Figure 13: Diagramme de dispersion des frictions et forces instantanées durant l'exploration tactile.....	41

## Liste des abréviations

$\mu_d$ : Coefficient de friction dynamique

dFtan: dérivé de la force tangentielle

F<sub>N</sub>: Force normale à la surface

Ftan: Force tangentielle à la surface

PC: Pacini Corpuscle (Corpuscule de Pacini)

RAI: Rapidly Adapting fiber type I (Fibre à adaptation rapide de type I)

RAII: Rapidly Adapting fiber type II (Fibre à adaptation rapide de type II)

RMS: Root Mean Square (Valeur efficace)

RMSdFtan: Root Mean Square of the derivative of tangential force (Valeur efficace  
de la première dérivée de la force tangentielle)

SAI: Slowly Adapting fiber type I (fibre à adaptation lente de type I)

SAII: Slowly Adapting fiber type II (fibre à adaptation lente de type II)

## **Remerciements**

L'auteur voudrait remercier son directeur Allan M. Smith pour son constant support tout au long de l'expérience et de l'écriture du mémoire. Merci aussi à Lise Lessard pour le support technique en général et spécialement pour sa patience à la fabrication des électrodes. Je voudrais aussi remercier Christine Desmarais, François Rivet et Alexandre Pastor-Bernier pour les longues discussions et réflexions constructives sur l'exploration tactile et le toucher en général.

Montréal, février 2008

Pascal Fortier-Poisson

# **Introduction**

## **1.0 L'EXPLORATION TACTILE**

Pour bien apprécier le côté physiologique de l'exploration tactile, il est important de mettre en lumière les informations codées par les mécanorécepteurs de la peau glabre de la main. Cette information couvre une panoplie de sensations dont découlent des activités physiologiques complémentaires telles que la température, la pression, les mouvements et la douleur. Cette activité suit ensuite des voies ascendantes particulières vers le cortex somatosensoriel primaire qui recombine l'information périphérique et fournit les bases informatives d'une action motrice adéquate. L'exploration tactile chez le singe est une nouvelle façon d'aborder la problématique de l'interaction sensorimotrice. Le présent projet présente l'exploration tactile comme une tâche pour laquelle le singe, comme l'humain, possède une stratégie de déplacement et de déformation de la peau. Le mémoire analyse par la suite cette stratégie lors d'une modification des propriétés de la surface, sa texture et son coefficient de friction.

## **2.0 ÉLECTROPHYSIOLOGIE DES RÉCEPTEURS**

### **2.1 Stimulations simples**

La base des connaissances sur les réponses des mécanorécepteurs de la peau glabre a été acquise à partir d'enregistrements dans le nerf médian de l'avant-bras de sujets humains et de primates. Les réponses ainsi recueillies ont été classées selon la

réaction électrophysiologique à une indentation verticale contrôlée sur le champ récepteur des mécanorécepteurs. La dimension temporelle des réponses a pu être explorée soit par le prolongement du stimulus, soit par sa répétition selon un rythme à forme sinusoïdale. Dans ce dernier cas, on parle de vibration puisque le stimulus est répété plusieurs fois par seconde. Dans ces expériences, une réponse du récepteur à chaque indentation induite durant la stimulation est désignée comme une réponse optimale à la stimulation. De sorte que les seuils de vibration sont évalués selon un rapport de un pour un entre la stimulation et la réponse du récepteur. Bien qu'il existe d'autres moyens d'évaluer la sensibilité aux vibrations, tel que l'évaluation des harmoniques (Gottschaldt et al. 1973), l'évaluation 'un pour un' peut être vue comme un encodage optimal du signal brut. Selon cette classification, on trouve dans la peau glabre les afférences à adaptation rapide (Rapidly Adapting) de type I et II (RAI et PC) et les afférences à adaptation lente (Slowly Adapting) de types I et II (SAI et SAII) (pour une revue, Hamann 1992). La suite de la revue de littérature traitera principalement des deux mécanorécepteurs acceptés dans la littérature comme étant à la source de la capacité de discrimination de petits obstacles surélevés (Vega-Bermudez et al. 1991), soit les RAI et les SAI. Ces récepteurs ont été plus largement étudiés dans le cadre du toucher fin. Mountcastle et ses collègues (Mountcastle et al. 1967) ont été les premiers à classifier trois différents types de récepteurs. Deux types de récepteurs, les SAI et les RAI sont situés juste en dessous de la surface de la peau, le long des crêtes des papilles entre le derme et l'épiderme. Le troisième type de récepteurs, les RAI, se trouve dans les structures profondes du derme.

Le premier type, SAI, présente une grande fréquence de décharge à la déformation de la peau et diminue son activité dans les 100 à 200 msec suivant la stimulation. Le récepteur conserve une activité réduite pendant plusieurs secondes si la déformation de la peau persiste. L'amplitude de la déformation de la peau module la fréquence de l'activité prolongée. Plus le stimulus déforme la peau, plus la fréquence de l'activité tonique sera haute. Ce type d'afférence ne semble pas participer à la perception de la vibration de plus de 10 Hz (Mountcastle et al. 1967) puisqu'il ne traduit pas le signal brut de la vibration.

Le second type de mécanorécepteurs situé au niveau des crêtes digitales regroupe les récepteurs à adaptation rapide de type I (RAI). Ceux-ci répondent seulement au début d'une stimulation même si celle-ci est prolongée et ne répondent pas à 'un pour un' à un stimulus de vibration d'une fréquence supérieure à 40 Hz. Ces récepteurs participent donc à la perception des vibrations de basse fréquence (appelées *flutter*).

Le troisième type de mécanorécepteurs identifié par Mountcastle et ses collègues (Mountcastle et al. 1967), se situe en profondeur dans le derme. Les auteurs suggèrent que ces récepteurs sont des corpuscules de Pacini (PC). Ces récepteurs à adaptation rapide de type II (RAII) répondent de façon optimale à des fréquences de cycle de stimulation entre 150 et 250 Hz. Ils seraient les récepteurs permettant de percevoir la vibration.

Les concordances anatomiques des RAI et des SAI ne sont pas supportées par des preuves formelles (Goodwin et Wheat 2004). Toutefois, les deux types de cellules du derme superficiel de la peau glabre couramment associés aux RAI et SAI sont les



corpuscules de Meissner (Iggo et Ogawa 1977) et les cellules de Merkel (Iggo et Muir 1969). Ces cellules sont situées entre le derme et l'épiderme de la peau glabre de la main (Cauna 1956). Les corpuscules de Meissner sont au sommet des crêtes papillaires alors que les cellules de Merkel sont disposées au creux des mêmes crêtes (Paré et al. 2002 a).

La densité des mécanorécepteurs n'est pas uniforme selon les régions de la main. La densité des RAI et des SAI du bout des doigts est de beaucoup supérieure à celle du reste de la main (5,30 unités/mm<sup>2</sup> et 2,65 unités/mm<sup>2</sup> par rapport à 0,93 unités/mm<sup>2</sup> et 0,30 unités/mm<sup>2</sup> respectivement) (Johansson et Vallbo, 1979). Cette densité doit être considérée de façon relative selon les régions de la main et ne témoigne qu'en partie de la grande quantité de mécanorécepteurs dans la peau de la main. D'un point de vue morphologique, plus du trois quart des creux des crêtes digitales du bout des doigts sont innervées par des cellules de Merkel et la densité des corpuscules de Meissner atteint de 47,25 à 60,3 unités/mm<sup>2</sup> (Paré et al. 2002 a).

## **2.2 Parcours de surface**

L'introduction du mouvement pour la stimulation d'un récepteur peut se faire par le glissement d'une surface sur la région du doigt où est situé le champ récepteur de la cellule. Dans ces conditions, les RAI détectent les phases transitoires au début et à la fin du glissement (Srinivasan et al. 1990). D'autre part, chaque SAI montre une meilleure réponse pour une direction de glissement donnée de sorte que l'ensemble des SAI renseigne à propos de la direction du glissement (Srinivasan et al. 1990).

Une aspérité sur la surface plate et autrement lisse provoque une réponse des mécanorécepteurs. La taille de l'aspérité sur la surface a une incidence sur la réponse électrophysiologique du récepteur. Lamotte et Whitehouse (1986) ont montré que le seuil de détection, c'est-à-dire la plus petite perturbation qu'un sujet est capable de ressentir, correspond au seuil des RAI enregistrés dans le nerf médian (2 à 4  $\mu\text{m}$  de hauteur). Les SAI ont un seuil de 8  $\mu\text{m}$ , plus élevé que celui des RAI tandis que les PC, bien que plus sensibles aux stimulations par filament de Von Frey, présentent une différence de décharge lorsque l'aspérité est plus grande que 21  $\mu\text{m}$ . L'augmentation de la hauteur du point fait augmenter le nombre d'impulsions des RAI. La force de contact entre la surface et le doigt lors du glissement ou la vitesse de glissement n'affecte pas le nombre d'impulsions générées par les RAI lorsque le champ récepteur rencontre l'aspérité (Lamotte et Whitehouse, 1986).

L'information spatiale des aspérités d'une surface est encodée par les mécanorécepteurs périphériques avant d'être acheminée vers le cortex. Pour caractériser cette opération, Phillips et ses collègues (1988) ont dressé une carte de la réponse des mécanorécepteurs pendant que des aspérités (des lettres surélevées) étaient glissées de façon répétée sur le champ récepteur de l'afférence enregistrée. La surface était déplacée latéralement par rapport au champ récepteur après chaque passage longitudinal, de sorte qu'à la fin, le champ récepteur avait passé sur toute la superficie des lettres surélevées. La carte des taux de décharge générée par ce procédé fournit un modèle du comportement de transformation d'information d'une population de mécanorécepteurs. Sous ce modèle, les potentiels d'action des RAI et SAI reproduisent une image isomorphe des irrégularités parcourues (Blake et al.

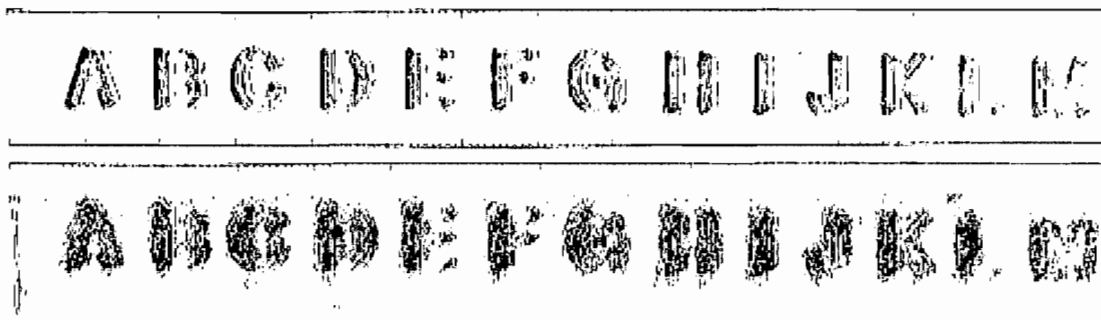


Figure 1 : Carte des taux de décharge des SAI (en haut) et RAI (en bas) selon le déplacement de la surface sous le champ récepteur. Il s'agit de plusieurs enregistrements accolés les uns aux autres pour exprimer la réponse du récepteur pour toute la largeur de la surface. Pris de Phillips et al. (1988).

1997 b), c'est-à-dire que les potentiels d'action de ces récepteurs reproduisent une image spatiale et temporelle de la surface parcourue (Figure 1). Par contre, les RAI et les SAI ne reproduisent pas ce type d'image. Les RAI et SAI sont donc les récepteurs cutanés utilisés par le cerveau pour la transduction des paramètres mécaniques des surfaces.

La hauteur ou la profondeur des irrégularités sur une surface plane influence la puissance de la réponse des mécanorécepteurs (Blake et al. 1997 b). La variation d'activité est différente selon le type de récepteurs. Les RAI et les SAI répondent deux fois plus à l'arête montante (début d'une bosse ou fin d'un trou) qu'à l'arête descendante. Ceci peut s'expliquer par la limite de déformation de la peau qui est forcée à se modifier face à l'obstacle physique que représente une arête ascendante. Une arête descendante ne déforme la peau que par la perte de contact entre la peau et la surface. Par ailleurs, l'activité des SAI est augmentée si une aspérité carrée de la surface se présente de coin plutôt que d'arête (Blake et al. 1997 a). De plus, la pente de l'arête que rencontre le doigt a un impact sur la réponse des SAI selon si la pente est douce ou abrupte (Lamotte et Srinivasan, 1987a). L'activité du RAI est grandement influencée par la portion sinusoïdale de la pente et sa sensibilité à la

rampe correspond au seuil de détection de cette même rampe par l'humain (Lamotte et Srinivasan, 1987b).

### 2.3 Angle de stimulation

La direction du mouvement d'une surface sur le doigt influence préférentiellement la réponse des SAI (Srinivasan et al. 1990). Toutefois, la portion verticale de la force résultant du glissement de l'aspérité de la surface sur la peau était beaucoup plus grande que la résistance horizontale. En exerçant une force distante de 20 degrés de l'axe verticale et en variant la direction de la composante horizontale (direction proximale, distale, radiale ou ulnaire), Birzniek et ses collaborateurs (Birzniek et al. 2001) ont pu montrer que les mécanorécepteurs avaient une fréquence de réponse variant selon la direction des stimuli de cette magnitude (Figure 2).

Chacun des SAI et des RAI a été plus sensible à une direction particulière. L'expérience consistait à apposer une surface sur le bout du doigt et y exercer une force dont les composantes normale et tangentielle variaient. La stimulation de base consistait en l'application d'une force normale sans force tangentielle. Lors des

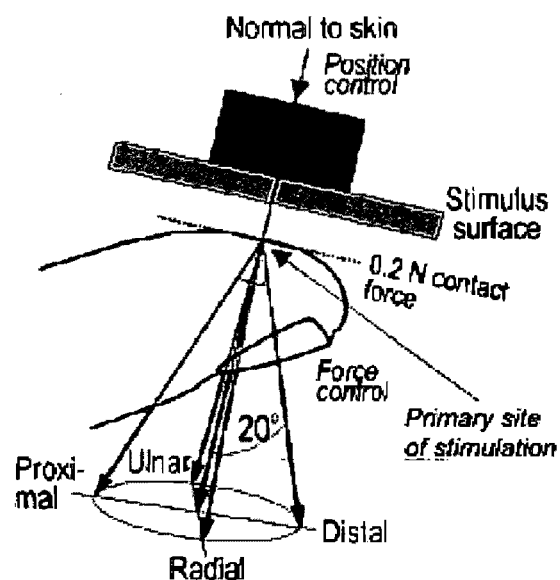


Figure 2 : Angles de stimulation et nomenclature des directions d'application de l'expérience de Birzniek et al. 2001.

normale dans huit directions différentes de 45 degrés dans le plan du doigt pour induire un cisaillement entre la surface et le bout du doigt. Ces différences de taux de décharge sont distribuées dans toutes les directions analysées mais pas de façon uniforme. Chaque type de récepteur a un grand sous-ensemble plus sensible à une certaine direction. De la population de SAI, le plus grand sous-groupe répondait mieux à la direction distale alors que les RAI montraient une tendance d'orientation proximale-radiale. La direction du vecteur résultant des forces normale et tangentielle à la peau amenait donc une variation de réponse selon l'afférence (Birznieks et al. 2001). Pour Birzniek et ses collègues (2001), cette asymétrie de réponse aux directions s'explique par la contribution de tous les types d'afférences à l'encodage de la direction lorsque la force de contact est similaire à celle observée dans la vie courante. Toutefois, ces résultats peuvent être dus aux propriétés mécaniques de la peau. L'asymétrie des réponses des récepteurs serait une conséquence de la géométrie et la structure des crêtes digitales. La déformation de la peau du doigt face au cisaillement varie en fonction de l'orientation des crêtes rapportée dans d'autres études (Lévesque et Hayward 2003, Wang et Hayward 2007). Puisque les récepteurs sont situés à l'apex ou à la base de ces crêtes, leur sensibilité s'explique par leur position plutôt que par leurs propriétés intrinsèques. Le tableau 1 récapitule la réponse des différents types de récepteurs aux différents types de stimulations.

Tableau 1: Propriétés des réponses des quatre types de mécanorécepteurs					
Type		RAI	PC (RAII)	SAI	SAII
Adaptation		Rapide	Rapide	Lente	Lente
Densité	Distribution	Concentrés au bout des doigts	Uniformément distribués	Concentrés au bout des doigts	Uniformément distribués
	Bout du doigt	5,30 unités/mm <sup>2</sup>	0,81 unités/mm <sup>2</sup>	2,65 unités/mm <sup>2</sup>	0,35 unités/mm <sup>2</sup>
	Phalanges	de 1,40 à 2,92 unités/mm <sup>2</sup>	de 0,36 à 0,58 unités/mm <sup>2</sup>	de 1,12 à 1,57 unités/mm <sup>2</sup>	de 0,29 à 0,52 unités/mm <sup>2</sup>
	Paume	0,93 unités/mm <sup>2</sup>	0,35 unités/mm <sup>2</sup>	0,30 unités/mm <sup>2</sup>	0,59 unités/mm <sup>2</sup>
Stimulus fixe		Phase dynamique de stimulation	Prise de contact	Tout au long de la stimulation	Accélération de l'activité rythmique
Vibration		10 à 40 Hz	150 à 300 Hz	Moins de 10 Hz	NA
Saisie-Levée		Prise et relâche	Mouvement de l'objet	Tout au long de la tâche	Tout au long de la tâche et préférence pour la direction des forces
Parcours de surface	Hauteur de la cible	Varie le nombre de récepteurs sollicités	Non représentatif	Varie le nombre de décharges d'un nombre de récepteurs constant	Non représentatif
	Taille de la cible	Seuil de détection du sujet. Petite variation de hauteur varie le nombre de décharges Seuil : 2 à 4 µm	Peu sensible Seuil : 21 µm	Sensible Seuil : 8 µm	NA
	Glissement et texture	Début d'un glissement de la surface sur la peau	Détection de micro texture	Direction d'un glissement	
	Forme de perturbation	Portion sinusoïdale de la pente Différence de décharges entre pentes semblables	NA	Profil spatial et courbure de la peau en contact	NA
Angle de stimulation		Population préfère direction proximale-radiale	NA	Population préfère direction distale	Population préfère direction proximale

Tableau 1 : Propriétés des réponses des quatre types de mécanorécepteurs à différents stimuli provenant de différences expériences (Johansson et Vallbo, 1979; Mountcastle et al. 1967; Chambers et al. 1972; Westling et Johanson, 1987; Blake et al. 1997a et b; Lamotte et Whitehouse, 1986; Lamotte et Srinivasan, 1987 a et b; Birznieks et al. 2001).

### 3.0 FORCES SUR LA PEAU

L'interaction entre le système sensorimoteur et son milieu physique peut être caractérisée par les forces appliquées sur la peau. Dans le cas de la peau glabre de la main, les irrégularités de l'épiderme adhèrent au substrat extérieur grâce à la sueur et se déforment par rapport aux structures rigides et profondes de la main telles que le derme, l'ongle et l'os. Les récepteurs liés à la fois à l'épiderme et au derme sont sensibles aux déformations de la peau et de là, ont une activité proportionnelle aux forces appliquées. Lors du déplacement latéral du doigt sur une surface plate, les forces agissant sur la peau peuvent être décomposées en deux vecteurs, soit la force normale, perpendiculaire au plan de la peau et la force tangentielle, parallèle à ce même plan. Ces deux vecteurs peuvent être appréciés de façon indépendante de telle sorte qu'une variation de la force normale n'affecte pas la quantification de la force tangentielle (Paré et al. 2002 b; Wheat et al. 2004). D'autre part, l'appréciation du milieu est une interprétation de la combinaison de toutes les forces. Par exemple, lors du glissement du doigt sur la surface, une bosse de courbure gaussienne sur une surface plate crée une variation des deux vecteurs de forces. Robles-de-la-Torre et Hayward (2001) ont mis au point un appareil générant une surface virtuelle capable de dissocier les forces normale et tangentielle. La pastille sur laquelle reposait le doigt du sujet pouvait recréer les forces tangentielles inhérentes au passage du doigt sur une bosse de forme gaussienne. Il est à noter qu'il n'y avait aucun mouvement vertical. Dans ces conditions, les sujets rapportaient avoir senti une bosse. La seconde démonstration consistait au parcours d'une surface plate réelle comportant un creux de forme gaussienne auquel étaient superposées les forces tangentielles engendrées

par une bosse gaussienne virtuelle. Les sujets ne percevaient pas de creux sur cette combinaison de creux réel et de forces de bosse virtuelle malgré le mouvement de la pastille. Les résultats de ces deux études mettent en évidence l'importance de la force tangentielle comme information cutanée.

#### **4.0 TRAJECTOIRE DE L'INFORMATION DE LA MAIN À SI**

Le chemin parcouru par l'information tactile jusqu'au cortex est bien connu. Lorsqu'un stimulus est appliqué sur la peau, celle-ci se déforme et active les récepteurs appropriés. Les potentiels d'action produits par ces récepteurs sont acheminés dans les nerfs périphériques par les fibres myélinisées A $\beta$  à une vitesse entre 40 et 70 m/sec (Knibestol 1973) pour les mécanorécepteurs cutanés et par les fibres non-myélinisées et A $\delta$  à une vitesse comprise entre 0,1 et 0,8 m/sec (Lamotte et Campbell, 1978) pour les thermorécepteurs et les nocicepteurs. La portion sensorielle du nerf périphérique rejoint le ganglion postérieur de la racine dorsale où le corps cellulaire de ces fibres est situé. Les informations des récepteurs de la peau glabre de l'index, du majeur et d'une partie de l'annulaire passent par le nerf médian vers le huitième segment cervical de la moelle épinière. Les efférences du ganglion rejoignent deux régions de la moelle; d'une part, celles issues des fibres myélinisées de petit calibre (A $\delta$ ) et des fibres C non-myélinisées font synapse dans les couches I à VIII de la moelle (Light et Perl, 1979) et décussent immédiatement pour rejoindre la voie antéro-latérale controlatérale à la stimulation. Cette voie rejoint directement le noyau ventral postérieur du thalamus controlatéral à la stimulation. D'autre part, les efférences des fibres myélinisées des mécanorécepteurs montent directement au



noyau cunéiforme ipsilatéral à la stimulation (Chang et Rauch, 1947) via le fascicule cunéiforme de la colonne dorsale ipsilatérale à la stimulation (Pubols et al. 1965; Shriver et al. 1968; Uddenberg, 1967a; Walker et Weaver, 1942). Il y a alors une première synapse suivie d'une décussation par les fibres du lemnisque médian contralatéral à la stimulation qui rejoignent le noyau ventral postérolatéral du thalamus (Bowsher, 1958). Une seconde synapse dans le thalamus amène l'information des deux types de fibres, celle de la voie antéro-latérale et celle du lemnisque médian au cortex somatosensoriel primaire (Poggio et Mountcastle 1960). Il est à noter qu'il y a une autre voie ascendante pour les stimuli mécaniques, soit la voie postsynaptique de la colonne dorsale appelée aussi la voie ascendante du funiculus dorsal (Uddenberg, 1967b). L'importance de cette voie est beaucoup discutée (Willis et Westlund, 1997).

## **5.0 SYSTÈME NERVEUX CENTRAL**

### **5.1 Données générales**

Le comportement des mécanorécepteurs périphériques est partiellement reproduit au niveau du cortex somatosensoriel primaire. Hyvarinen et ses collègues (1968) ont identifié deux classes de neurones du gyrus postcentral du singe réagissant aux stimulations vibratoires sur la main. Ces dernières étaient identiques à celles utilisées précédemment par le même groupe (Mountcastle et al. 1967). Ils ont montré qu'une première classe de neurones de S1 est sensible aux hautes fréquences (50 à 400 Hz) de faible intensité. Les neurones de la seconde classe s'adaptent rapidement à une stimulation ponctuelle unique. Ces types de réponses neuronales se retrouvent également dans le cortex moteur sous la nomenclature phasique (adaptation rapide) et

tonique (adaptation lente). Bien qu'il y ait une différence quant à la concentration de ces types de réponses entre le cortex somatosensoriel primaire et le cortex moteur, ils se retrouvent également dans les deux régions (Wannier et al. 1991). Comparativement au cortex moteur, le cortex sensoriel a plus de champs cutanés et répond de façon positive à la force appliquée durant une tâche de préhension (Wannier et al. 1991).

## **5.2 Préhension et coefficient de friction**

Lors de la préhension, les neurones à adaptation rapide enregistrés dans le cortex somatosensoriel primaire répondent généralement à tout changement de force sur la peau, tel que le premier contact, le relâchement ou le glissement de la surface (Salimi et al. 1999 a). L'activité des neurones à adaptation lente commence à partir de la prise de l'objet et continue tout au long de la phase statique de la stimulation (Salimi et al. 1999 a). Certaines cellules répondent différemment selon la texture ou le poids de l'objet soulevé (Salimi et al. 1999 b). D'autre part, 67% des cellules de la région de la main du cortex somatosensoriel primaire présentent une modulation de la décharge lorsque le coefficient de friction est modifié par un lubrifiant ou un adhésif (Salimi et al. 1999 c). Des neurones sensibles au coefficient de friction, plus de la moitié montrent une augmentation de leur activité lorsque l'objet glisse entre les doigts de l'animal. De ces neurones, un peu plus de la moitié ont également une réponse plus forte lorsque la peau est soumise à une force de cisaillement sans glissement (Salimi et al. 1999 c). Il y a donc des cellules du cortex qui sont sensibles au cisaillement et d'autres uniquement au cisaillement qui entraîne un glissement.

D'autre part, la réponse cellulaire à l'augmentation de la force appliquée par le doigt, positive dans la majorité des cas, peut parfois consister en une diminution de la décharge neuronale (Wannier et al. 1991).

### **5.3 Les aires somatosensorielles (particulièrement 3b)**

Les aires corticales somatosensorielles sont différentes par leurs afférences et la taille des champs récepteurs. Les aires 1 et 3b sont majoritairement cutanées alors que l'aire 3a est principalement proprioceptive (Nelson et al. 1980; Phillips et al. 1971). Les neurones de l'aire 1 possèdent de grands champs récepteurs alors que ceux des neurones de l'aire 3b sont plus petits (Salimi et al. 1999a; Sur et al. 1980). Les neurones de la région des doigts de l'aire 3b du macaque ont des champs récepteurs cutanés représentés par de petites zones excitables (moyenne de 14 mm<sup>2</sup>) entourées totalement ou en partie par une zone inhibitrice (DiCarlo & al. 1998).

### **5.4 Textures**

Les propriétés physiques de la surface sur laquelle une recherche d'aspérité est effectuée ont un impact sur les récepteurs cutanés. Les paramètres physiques exacts de l'appréciation de la rugosité ne sont pas encore bien définis (Yoshioka et al. 2007). Les forces s'opposant aux déplacements du doigt sur la surface, la variation de ces forces (Smith et al. 2002b) et la vibration occasionnée par le passage du doigt sur la surface (Hollins et Bensmaia, 2007) sont impliquées dans l'appréciation de la texture des surfaces. De façon plus prosaïque, la période spatiale et la taille des

aspérités de la surface sont utilisées pour définir la texture d'une surface (Connor et Johnson 1992, Meftah et al. 2000). Durant l'exploration tactile, la texture de la surface devient la sensation de base sur laquelle se superpose la perception d'une cible tactile. Les éléments tactiles qui créent la texture peuvent varier de grosseur et d'espacement. Avec des surfaces composées de petits cônes tronqués de 0,35 mm de hauteur et espacés de 1,3 à 6,2 mm, l'estimation de la rugosité par des sujets humains a formé un U inversé par rapport à la distance entre les points avec une rugosité maximale pour les points espacés de 3 mm (Connor et al. 1990). Soumis aux mêmes stimuli, les neurones du cortex somatosensoriel primaire du singe ont un taux de décharge moyen correspondant à l'espacement des points plutôt qu'à l'estimation de rugosité des sujets humains (Connor et al. 1990). C'est plutôt les variations dans le taux de décharge dues à la période spatiale qui corrélaient le mieux avec les estimations de rugosité des sujets (Connors et Johnson 1992). Cette dépendance spatiale par opposition à la période temporelle est inversement proportionnelle au nombre d'aspérités affectant la peau, peu importe l'angle par rapport au déplacement du doigt. La période temporelle réfère, quant à elle, au nombre de récepteurs dont la fluctuation des réponses est occasionnée par une suite d'aspérités. Plus précisément, le taux de décharge des SAI semble mieux refléter l'estimation de rugosité (Blake et al. 1997 b). Des textures à espacement plus fin, de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm, plus petits que les champs récepteurs des SAI, présentent encore une corrélation avec les variations du taux de décharge des SAI, non plus de façon unitaire mais lorsque l'on rassemble le taux de décharge d'une population de neurones (Yoshioka et al. 2001).

### **5.5 Influences cortico-corticales**

La main utilise les sensations tactiles et proprioceptives dans ses différentes interactions avec le milieu. Durant l'exploration tactile, la main est déplacée sur l'objet pour permettre à ses récepteurs cutanés et proprioceptifs d'acquérir le maximum d'informations sur l'objet. Le but du mouvement est perceptif et la motricité de la main sert à améliorer l'acquisition de l'information. L'exploration tactile recèle donc à la fois un volet moteur et un volet sensoriel.

La main utilise les sensations tactiles et proprioceptives durant la préhension et l'exploration d'un objet. Pour mieux sentir chaque caractéristique de la surface, la main adopte un comportement permettant de maximiser l'efficacité des récepteurs sensibles à cette caractéristique (Lederman & Klatzky 1987). Chez l'humain, les forces générées par le doigt lors de l'exploration tactile varient en fonction du coefficient de friction de l'objet (Smith et al. 2002 b). La même corrélation a pu être établie lors de la préhension (saisie-levée) chez l'humain (Cadoret et Smith, 1996). Cette même tâche de préhension est rendue beaucoup plus difficile si la peau des doigts est anesthésiée (Monzée et al. 2003).

Dans le présent projet, nous montrons en premier lieu que, comme l'humain, le singe conserve une vitesse d'exploration régulière et applique une force constante durant l'exploration tactile d'une surface plane. En second lieu, nous montrons en quoi le changement de coefficient de friction d'une surface influence la stratégie d'exploration du singe.

## **6.0 HYPOTHÈSES (STRATÉGIE D'EXPLORATION)**

Il a été montré que l'humain adopte une procédure comportementale constante et reproductible durant l'exploration tactile d'une surface quant à la vitesse du doigt, aux forces appliquées sur la surface et au parcours du doigt (Smith et al. 2002 b). Le sujet garde une force normale constante lorsque le coefficient de friction de la surface est augmenté par l'ajout de saccharose sur le doigt. La force tangentielle est alors plus élevée durant l'exploration. Puisqu'il s'agit d'une optimisation des actions motrices pour maximiser la capacité d'exploration, on devrait observer le même type de stratégie chez le singe. Celui-ci devrait donc appliquer une force normale constante au cours des essais et entre les différentes surfaces. La vitesse d'exploration devrait rester constante entre toutes les surfaces. De plus, la force tangentielle moyenne devrait varier en fonction du coefficient de friction des différentes surfaces.

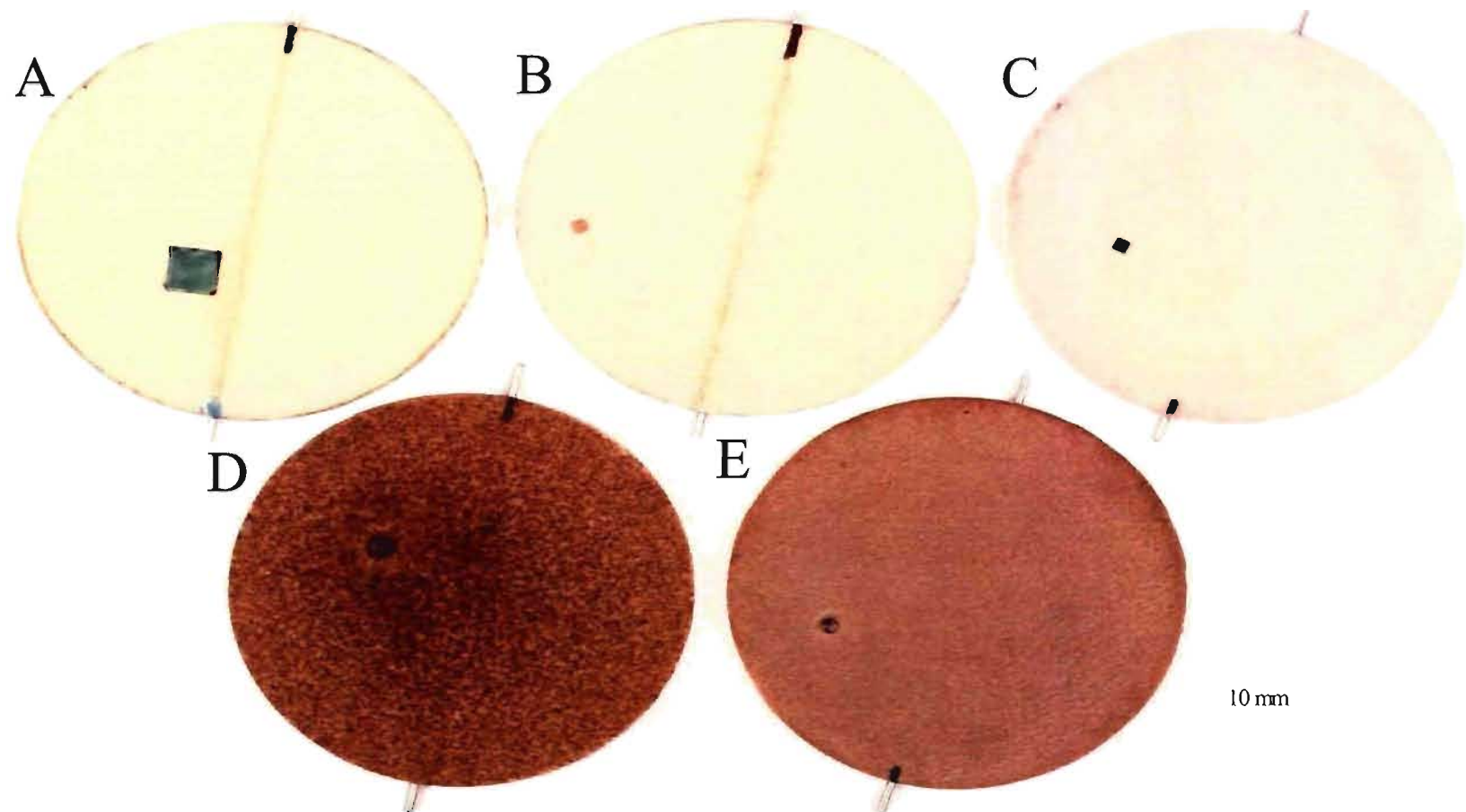


Figure 3: Surfaces utilisées durant l'entraînement et l'enregistrement de la tâche. La surface d'entraînement (A) est dotée d'une cible très large contrastante visuellement avec le reste de la surface. La surface de plastique sèche (B) est la surface sur laquelle se termine l'entraînement et est la surface témoin de l'enregistrement. La surface de plastique huilée (C) est pratiquement identique à la surface de plastique sèche mais recouverte d'huile. Suivent les surfaces de papier sablé à gros-grains (D) et fin (E) dont les cibles sont plus grosses que pour les surfaces de plastique.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 1.0 TÂCHE

#### 1.1 Tâche générale

Une femelle *Macaca fascicularis* (4 kg) âgée de 4 ans a été entraînée à parcourir une surface plane (75 mm de diamètre) avec le bout de ses doigts pour trouver une cible tactile surélevée sans support visuel. La cible était déplacée par rotation de la surface après chaque essai. La tâche a été effectuée sur quatre différents types de surface. Aucun temps limite n'était fixé à l'exploration bien que les surfaces aient été choisies pour que la cible soit trouvée en moins de deux secondes. Le présent protocole a été approuvé par le comité de déontologie de l'expérimentation sur les animaux de l'Université de Montréal.

#### 1.2 Tâche de base

Lorsque le singe exécutait la tâche d'exploration de base, il devait trouver une petite cible surélevée (0,25 mm de hauteur, 2,5mm d'arête) en parcourant une surface plane et lisse en plastique de 75 mm de diamètre (Tableau 2). Il n'a pas été possible d'entraîner le singe à effectuer l'exploration avec un seul doigt, l'animal préférant explorer la surface du bout des doigts, sans la paume ni les phalanges proximales, en majeure partie l'index et le majeur mais aussi l'annulaire et l'auriculaire à l'occasion. Plusieurs entraves forçant l'animal à n'utiliser qu'un doigt ont été tentées sans succès. Dans ce cas, l'animal laissait les autres doigts se promener mollement sur la surface.



Tableau 2: Localisation et dimension des cibles			
Surfaces	Distance radiale de la cible	Largeur de la cible	Hauteur de la cible
Plastique sec	26,1 mm	2,5 mm	0,25 mm
Plastique huilé	18,0 mm	2,5 mm	0,25 mm
Papier sablé fin	20,6 mm	3,0 mm	1 mm
Papier sablé gros-grains	15,2 mm	4,0 mm	2 mm

Table 2: Paramètres de localisation et de dimension des cibles des surfaces parcourues.

### 1.3 Variations de la tâche

À la tâche de base ont été ajoutés des blocs d'essais sur différentes surfaces. D'abord, la surface de plastique lisse a été lubrifiée à l'aide d'huile minérale. La cible était de même dimension que celle de la surface de plastique lisse sec. Les deux autres surfaces ont été recouvertes de papier sablé à grains de 0,19 ou de 0,12 mm de diamètre (soit des grades CAMI de 80 et 120 respectivement). Pour le reste de cet exposé, les surfaces seront dénommées *plastique lisse sec* pour la surface de base, *plastique lisse huilé* pour la surface sur laquelle a été étendue l'huile minérale, *papier sablé fin* pour la surface de papier de verre à petit grains de 0,12 mm de diamètre et finalement, la surface de papier de verre à gros grains de 0,20 mm de diamètre sera désignée par *papier sablé à gros-grains*.

Pour les deux surfaces de *papier sablé*, les cibles tactiles ont dû être grossies (entre 2-3 mm d'arête et 1-2 mm de hauteur) à cause de la plus grande difficulté à repérer les cibles plus petites sur les surfaces rugueuses (Tableau 2). La distance radiale entre le centre de la surface et la position de la cible variait un peu entre les surfaces (Tableau 2). La cible de la surface de plastique lisse sec était distante du centre de la surface de 26,1 mm, celle de la surface de plastique lisse huilé, de 18,0

mm. Sur les surfaces de papier sablé, la cible se situait à 20,6 mm du centre pour la surface de papier sablé fin et à 15,2 mm du centre pour la surface de papier sablé à gros-grains. Comparativement au rayon total de la surface (37,5mm), les cibles des surfaces de plastique et de la surface de papier sablé fin se trouvaient dans la moitié périphérique du rayon alors que la cible de la surface de papier sablé à gros-grains avait une position plus centrale sur la surface. L'animal devait effectuer un bloc de 50 à 100 essais réussis d'exploration sur une surface unique.

#### **1.4 Conditionnement**

L'entraînement a été fait par renforcement par approximation à l'aide d'une surface de plastique lisse dotée d'une grande cible surélevée (Figure 3A). Pour permettre à l'animal de comprendre plus rapidement la tâche, la surface était placée à la vue de l'animal de sorte qu'il puisse voir le contraste de couleur entre la cible et la surface. Quand l'animal a compris que l'action de peser sur la bosse résultait en une récompense, la surface a d'abord été masquée de sorte que l'exploration de l'animal ne reposait plus que sur la perception tactile. Par la suite, la surface d'entraînement a été remplacée par la surface d'enregistrement dotée d'une plus petite cible semblable à celles utilisées pour l'exploration tactile chez l'humain (Smith et al. 2002 b, Figure 3). À cette étape, le singe était en mesure d'explorer rapidement la surface à la recherche de la cible. Une fois la cible repérée, le singe signalait sa découverte en appuyant fortement sur la cible. Le signal de réussite et la récompense de jus survenaient uniquement après que l'animal ait retiré sa main de la surface de sorte qu'il devait se fier à la perception de ses doigts pour déterminer si l'essai était terminé

ou non.. Après le signal de récompense, la surface tournait, la cible était repositionnée et le singe pouvait initier le prochain essai aussitôt la rotation achevée. La tâche a donc été divisée en quatre parties : le contact avec la surface, la recherche de la cible avec les doigts menant à sa découverte et à l'application de la pression sur celle-ci, signifiant que l'animal avait trouvé la cible.

### **1.5 Durée d'entraînement**

L'entraînement a duré au moins un an, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'animal ait maîtrisé la tâche indépendamment de la cible recherchée, de sa position ou du type de surface. Par jour, le singe réussissait en moyenne 500 essais d'exploration de moins de six secondes chacun.

## **2.0 INSTRUMENTS D'ACQUISITION**

### **2.1 Appareils**

L'acquisition d'informations du mouvement et des forces de la main du singe durant l'exploration tactile a été faite par un capteur de forces et moments de force sur trois axes (X, Y et Z) (ATI Industrial Gamma Force Sensor) disposé en dessous de la surface d'exploration (Figure 4). Les valeurs des trois axes linéaires de force et des trois moments de force ont permis de calculer la position du centre de pression des doigts sur la surface (formule 1). Le capteur de force a été monté sur un moteur permettant la rotation de la surface entre chaque essai. Après chaque essai réussi, le moteur effectuait une rotation aléatoire déplaçant de façon angulaire la cible à une des

$$\text{PosX} = \frac{\text{Torque[Y]} - (\text{Force[X]} \times \text{BaseZ})}{\text{Force[Z]}}$$

$$\text{PosY} = \frac{\text{Torque[X]} - (\text{Force[Y]} \times \text{BaseZ})}{\text{Force[Z]}}$$

Formule 1 : Calcul de la position du centre de force sur le capteur, les forces et les moments de force (torques) sont connus. PosX et PosY étant les coordonnées X et Y de position, Torque[X] ou [Y] pour les moments de forces du plan horizontal et Force[X], [Y] et [Z] pour les forces mesurées selon les trois axes. BaseZ est une constante de position dans l'axe vertical correspondant à la distance entre le véritable 0 du capteur et le plan de la surface.

quatre positions angulaires prédéterminées. Une position ne revenait jamais deux fois de suite. La recherche tactile sur quatre positions sans support visuel a été jugée suffisante pour obliger le singe à chercher la cible par le sens du toucher plutôt qu'en mémorisant la position de la cible à l'essai précédent et la prédire pour l'essai en cours. Une caméra filmait la main du singe durant l'exploration permettant une analyse visuelle à posteriori du mouvement général de la main. L'enregistrement vidéo a servi à éliminer de l'analyse les mouvements de grande amplitude qui n'étaient pas liés à l'exploration.

## 2.2 Acquisition

Pendant l'exécution de la tâche, les voltages analogues correspondant aux 6 axes de force et moments de force fournis par le capteur ont été digitalisés par un convertisseur analogue-digital à un

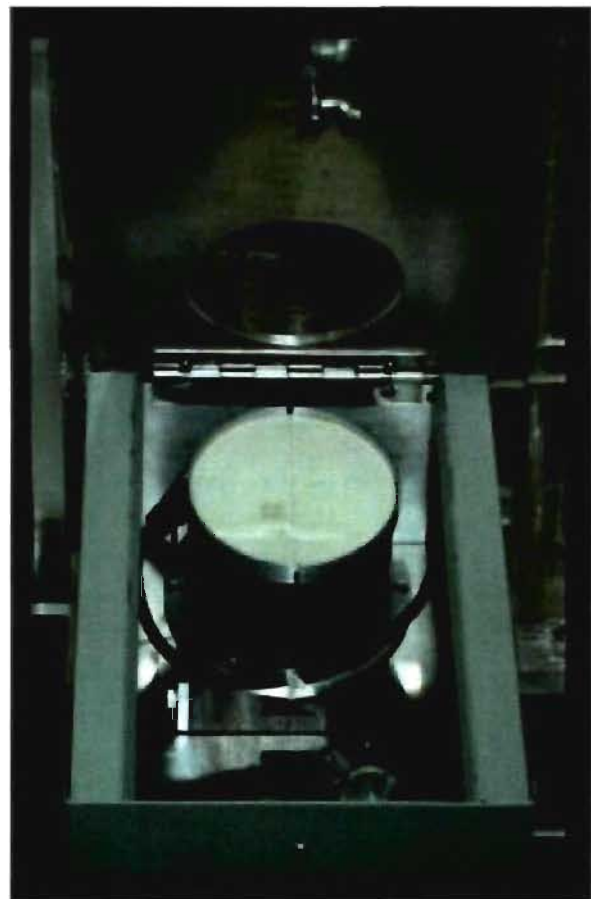


Figure 4 : Appareil d'entraînement complet d'exploration tactile. Capteur de forces avec surface posée sur la plateforme rotative. À noter que la surface possède un diamètre de 75 mm.

taux d'échantillonnage de 250 Hz et emmagasinés sur l'ordinateur. La position du centre de pression de la main du singe était calculée en temps réel et comparée à la position de la cible pour valider l'essai. L'acquisition des images vidéo à 30 images/sec était suffisante pour apprécier les mouvements liés à l'exploration tel que le mouvement de chacun des doigts sur la surface et pour retrancher les périodes avec mouvements parasites tel que l'application de la paume sur la surface.

### 3.0 DONNÉES

Un essai d'exploration du singe a été délimité par le moment où le doigt du singe entrait en contact avec la surface jusqu'au moment où il commençait à exercer une pression sur la cible (Figure 5). Seuls les essais de plus d'une seconde ont été conservés afin d'assurer un temps d'exploration suffisant pour l'analyse. En tout, celle-ci s'est effectuée sur 8000 essais échantillonnés lors de 256 séries d'essais étendus sur deux mois. Cela représente près de trois heures et demi d'exploration tactile soit plus de trois millions d'échantillons. Les surfaces n'ont pas été explorées le même nombre de fois. La surface de plastique sec a été explorée pendant 10 455 essais, la surface de plastique huilé 2601 essais, la surface de papier sablé fin 1712 essais et la surface de papier sablé à gros-grains 1825 essais. La force tangentielle a été calculée en prenant l'hypoténuse du triangle formé par les deux valeurs des forces des axes horizontaux X et Y de l'appareil (Figure 5 A et B). Il s'agit donc de la valeur scalaire du vecteur de la force tangentielle. Le coefficient de friction dynamique  $\mu$  a été calculé à partir de la formule classique d'Amontou et Coulomb (formule 2). Le

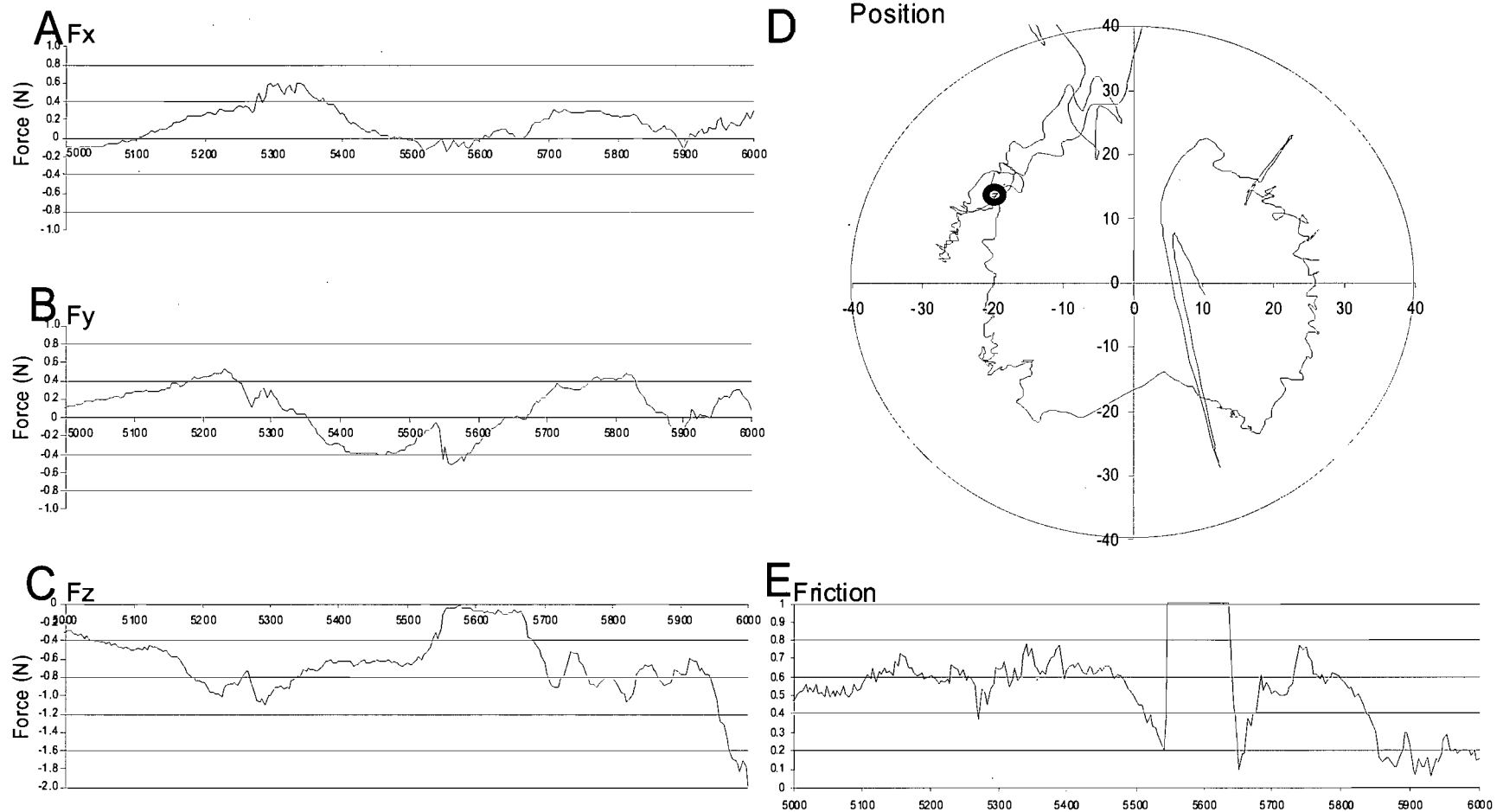


Figure 5: Exemple d'un essai sur la surface de plastique lisse sec avec les diagrammes des forces (A, B et C), de friction (E) et de parcours (D) sur la surface. La force tangentielle est l'hypoténuse des deux forces du plan horizontal X (A) et Y (B). La force normale correspond à la force sur l'axe Z (C). La surface est délimitée par le grand cercle et la cible est en rouge. Le trajet semble parfois sortir de la surface lorsque l'animal appuie sur les bords de la surface.

$$\begin{array}{ll} \text{A. } F_{\text{tan}} = \mu_d \times F_N & \text{B. } \mu_d = F_{\text{tan}} / F_N \\ \text{lorsque Vitesse} > 0 & \end{array}$$

Formule 2 : Formule de la friction telle qu'exprimée par Coulomb (A) et formule utilisée pour calculer le coefficient de friction dynamique  $\mu_d$  (B) selon les forces normale  $F_N$  et tangentielle  $F_{\text{tan}}$  enregistrées par le capteur de forces et moments de force.

coefficient de friction est donc une valeur calculée à partir des données fournies par le capteur de forces et moments de force.

#### 4.0 ANALYSE

L'échantillonnage du coefficient de friction (Figure 5E) ne fait pas la distinction entre la friction statique et dynamique. Pour les analyses, la friction dynamique a été isolée en ne prenant que les échantillons pour lesquels le doigt était en mouvement sur la surface. La dépendance des paramètres physiques au type de surface, lors de la recherche tactile, a été évaluée par des ANOVA simples et un test post-hoc de Tukey entre les moyennes par essai des paramètres physiques. Les moyennes par essai ont été préférées aux échantillons de base afin d'alléger la charge des programmes d'analyse.

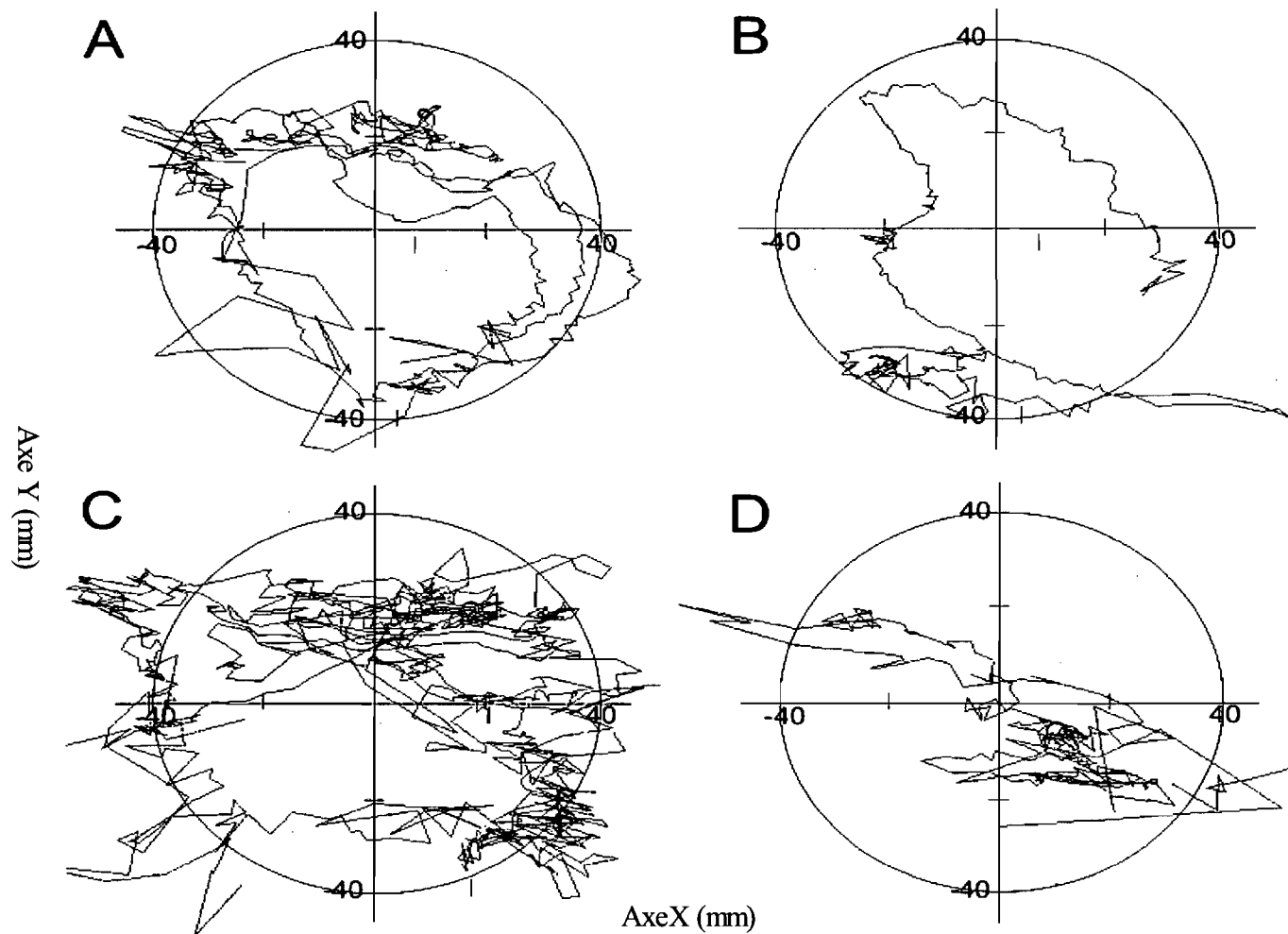


Figure 6: Exemple de la stratégie de parcours du singe selon la surface: Sur la surface de plastique lisse huilé (A), la surface de plastique lisse sec (B) et la surface de papier sablé fin (C), l'animal décrit approximativement des cercles autour de la surface et n'explore pas le centre de la surface. Dans le cas de la surface de papier sablé à gros-grains, l'animal fait des mouvements de va-et-vient.



## Résultats

### 1.0 STRATÉGIE D'EXPLORATION

Dans sa tâche d'exploration, le singe a montré un parcours exploratoire relativement uniforme entre les essais. La figure 6 montre un exemple des déplacements du centre des forces exercées par les doigts sur chacune des quatre surfaces. Dans cette figure, la trajectoire de la main semble parfois sortir de la surface d'exploration car l'algorithme utilisé pour visualiser les essais ne tient pas compte des moments où l'animal touche aux bords de la surface. Ces échantillons (quelques millisecondes) ont été retranchés des analyses subséquentes. La stratégie de parcours est restée semblable pour trois surfaces, soit la surface de plastique lisse sec, la surface de plastique lisse huilé et la surface de papier sablé fin. L'animal parcourait la périphérie de la surface en y décrivant des cercles plus ou moins réguliers qui rejoignaient les quatre positions possibles de la cible. Dans le cas de la surface de papier sablé à gros-grains, l'animal appliquait un mouvement de va-et-vient, d'orientation proximale-distale, différent de la stratégie utilisée pour les autres surfaces.

Les forces déployées durant l'exploration étaient très régulières, de faible amplitude et peu étendues en comparaison du spectre des capacités de l'animal. Par exemple, lorsque la cible était trouvée, l'animal appuyait sur celle-ci avec une force normale supérieure à 4 N. Le coefficient de friction dynamique peut être perçu comme une constante traduisant une force normale appliquée en une force tangentielle proportionnelle lors du déplacement du doigt. Par conséquent, tous les coefficients mesurés devraient tendre à une valeur moyenne. La figure 7 présente la

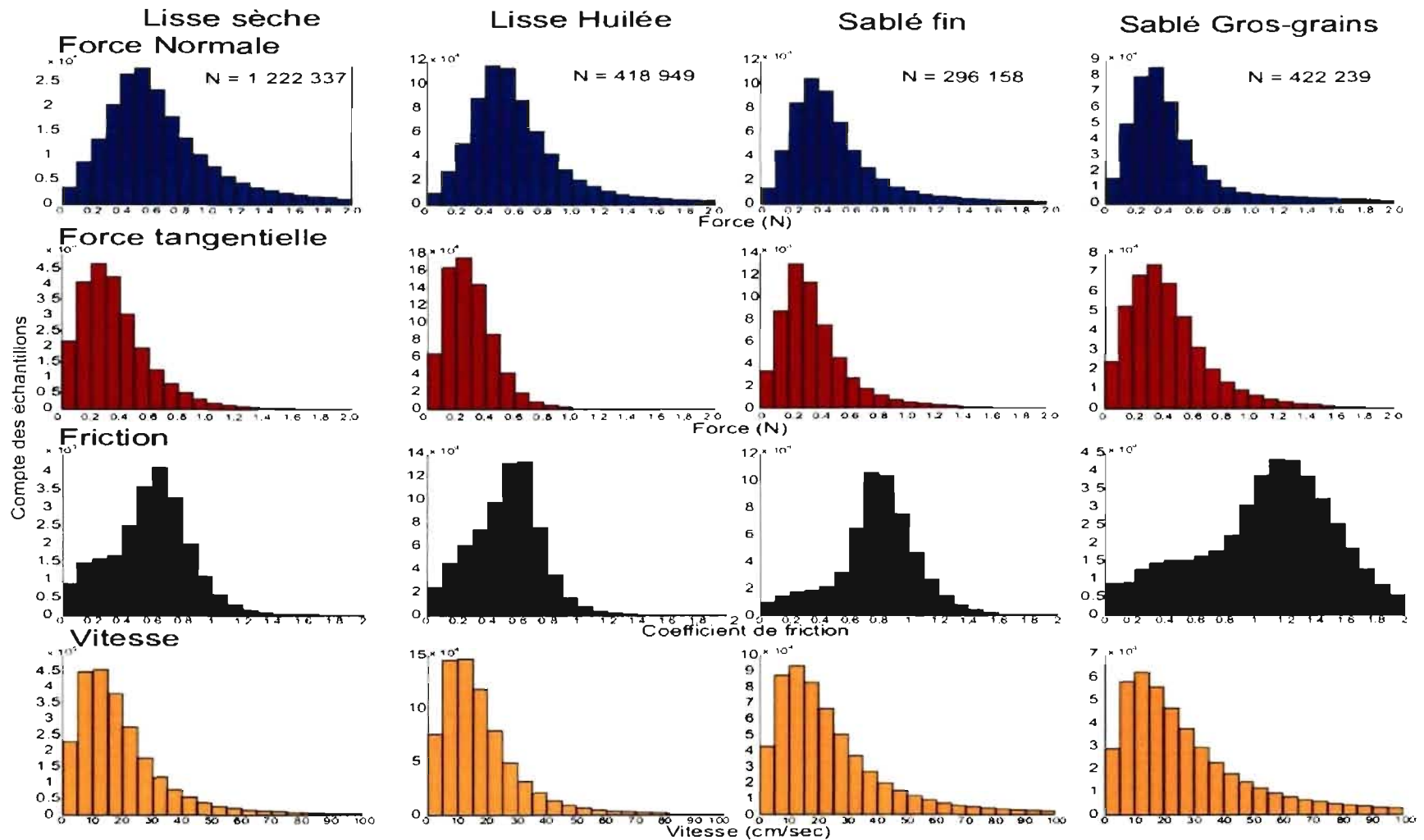


Figure7: Distribution de tous les échantillons de tous les essais des forces normale et tangentielle, de la friction dynamique et de la vitesse durant l'exploration selon le type de surface explorée : de plastique lisse sec, de plastique lisse huilé, papier sablé fin et papier sablé à gros-grains. Ces distributions ont toutes une asymétrie  $\alpha_3 < 1.2$ .

dispersion de tous les échantillons des forces, normale et tangentielle, de vitesse et de friction de tous les essais regroupés selon les quatre différentes surfaces. Les dispersions des forces normale et tangentielle, de la vitesse et de la friction ne respectent pas une distribution normale (Kolmogorov-Smirnov  $p < 0,001$  pour toutes les distributions). Les valeurs extrêmes et peu fréquentes expriment les possibilités de l'animal et les lectures erronées des capteurs. L'ANOVA, privilégiée pour ce type de données paramétriques, possède une certaine résistance à l'asymétrie de distribution après quoi elle diminue de puissance. Les distributions présentées dans la figure 7 n'étaient pas assez asymétriques pour compromettre les ANOVA.

## **2.0 STRATÉGIE ENTRE LES DIFFÉRENTES SURFACES**

### **2.1 Les forces normale et tangentielle**

La moyenne des forces selon le type de surface est exprimée dans les histogrammes de la figure 8. Le singe appliquait une force normale moyenne de 0,622 N (écart-type:  $\pm 0,144$ ) sur la surface de plastique lisse sec et de 0,595 N ( $\pm 0,137$ ) sur la surface de plastique huilé. Bien que la différence entre les forces normales moyennes des surfaces soit significative (ANOVA  $p < 0,001$ , Tukey  $p < 0,001$  pour toutes), elle n'est que de 3% entre la surface de plastique lisse sec et la surface de plastique lisse huilé. Pour la surface de papier sablé fin, la moyenne des forces normales appliquées par le singe est de 0,482 N ( $\pm 0,119$ ), soit de 22% inférieure à celle exercée sur la surface de plastique lisse sec. La surface de papier sablé à gros-grains a été la surface sur laquelle le singe appuyait le moins avec une force normale moyenne de 0,385 N ( $\pm 0,104$ ), représentant une diminution de 39% par rapport à la

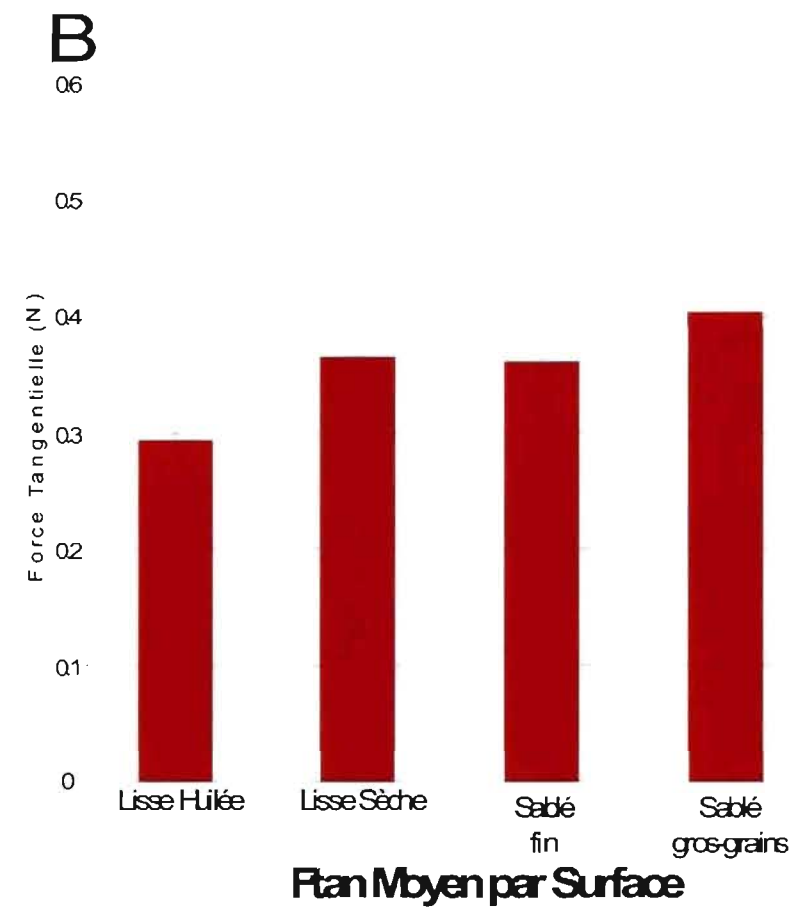
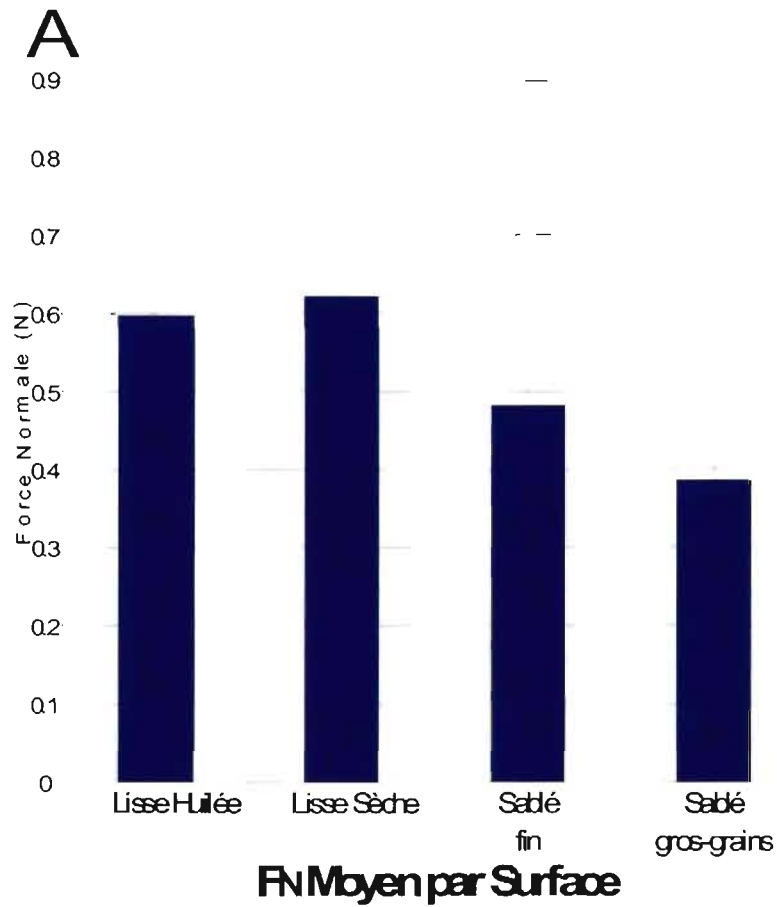


Figure 8: Moyenne des forces déployées durant l'exploration selon la surface. La force normale ( $F_N$ ) des surfaces de plastique lisse sec et huilé est constante alors qu'elle diminue significativement pour la surface de papier sablé fin et de façon prononcée pour la surface de papier sablé à gros-grains. La force tangentielle ( $F_{tan}$ ) diminue sur la surface de plastique huilé par rapport à la surface de plastique sèche. Elle est pratiquement identique entre les surfaces de plastique lisse et de papier sablé fin.

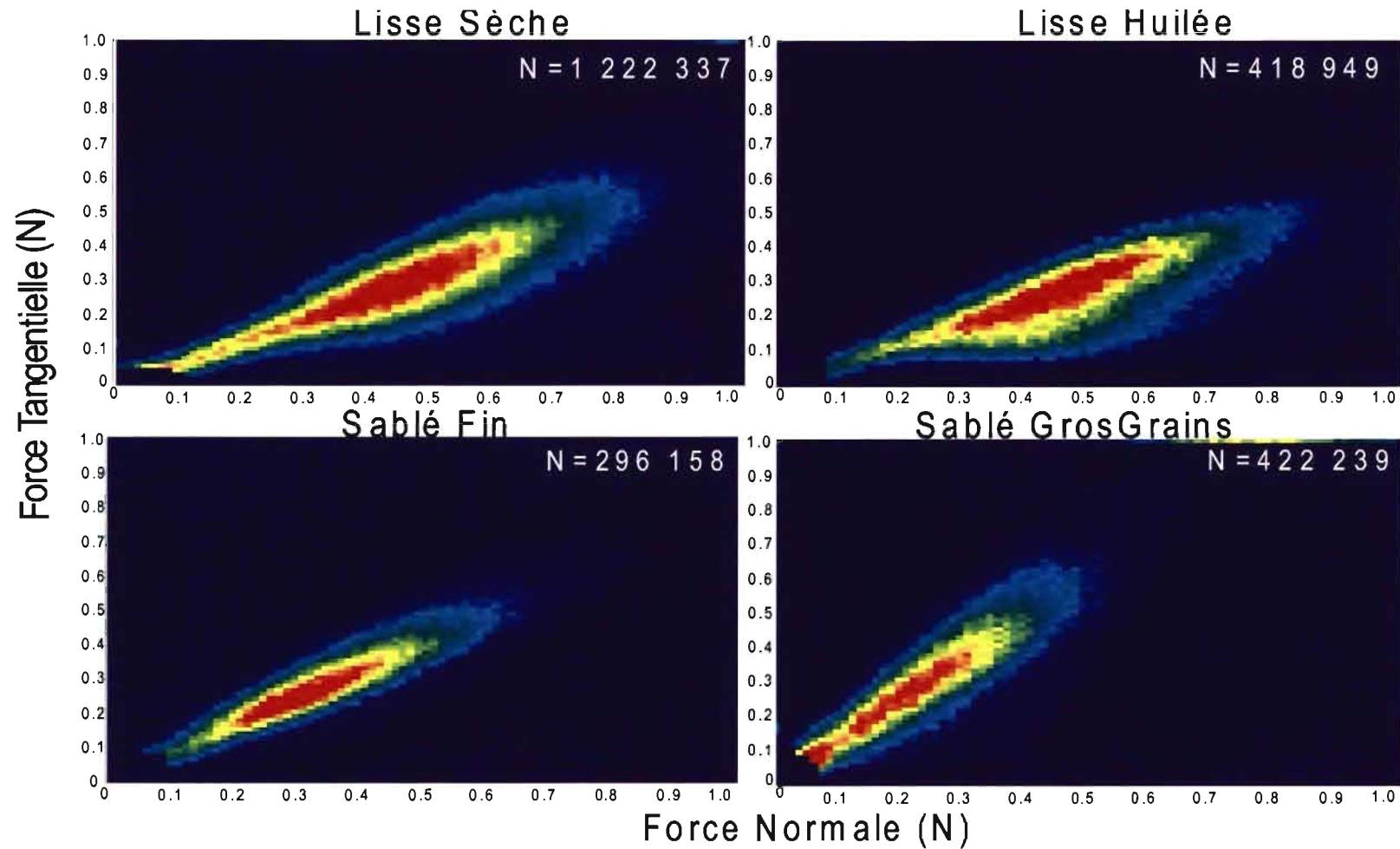


Figure 9: Représentation de la distribution croisée des forces normale et tangentielle instantanées pour chacune des surfaces. Les couleurs désignent la quantité d'échantillons pour chaque coordonnée du graphique. Bleu foncé pour les quantités nulles et rouge foncé pour la plus grande concentration

force normale appliquée sur la surface de plastique lisse sec. Les surfaces de plastique lisse sec et de plastique lisse huilé présentent donc des forces normales semblables alors que le singe diminuait la force normale moyenne appliquée sur les surfaces de papier sablé, de 0,1 N avec la surface de papier sablé fin et de 0,2 N pour la surface de papier sablé à gros-grains.

La figure 8b montre la force tangentielle moyenne exercée par le singe sur la surface. La moyenne la plus basse de force tangentielle a été exprimée lors de l'exploration de la surface de plastique lisse huilé (0,295 N  $\pm$ 0,067), de 19% inférieure à la force tangentielle moyenne exercée sur la surface de plastique lisse sec (0,366 N  $\pm$ 0,104). La force tangentielle moyenne appliquée sur la surface de papier sablé fin, soit de 0,362 N ( $\pm$ 0,100), n'est pas significativement différente (1,1%, ANOVA  $p < 0,001$ , Tukey  $p > 0,6$ ) de la moyenne de la force tangentielle enregistrée durant le parcours de la surface de plastique lisse sec. La force tangentielle moyenne était maximale lors de l'exploration de la surface de papier sablé à gros-grains avec une moyenne de 0,405 N ( $\pm$ 0,144), significativement supérieure (Tukey,  $p < 0,001$ ) de 11% à celle exprimée sur les surfaces de plastique lisse sec et de papier sablé fin.

La force tangentielle résulte de la relation entre la force normale et le coefficient de friction durant le parcours de la surface. De ce fait, un changement du coefficient de friction dynamique ou un changement de la force normale exercée par le singe aboutit à la variation de la force tangentielle. Celle-ci peut être vue comme la conséquence du glissement du doigt sur la surface selon le coefficient de friction dynamique et la force normale exercée par le singe. La figure 9 montre la relation entre les deux forces, normale et tangentielle, par des diagrammes de dispersion pour

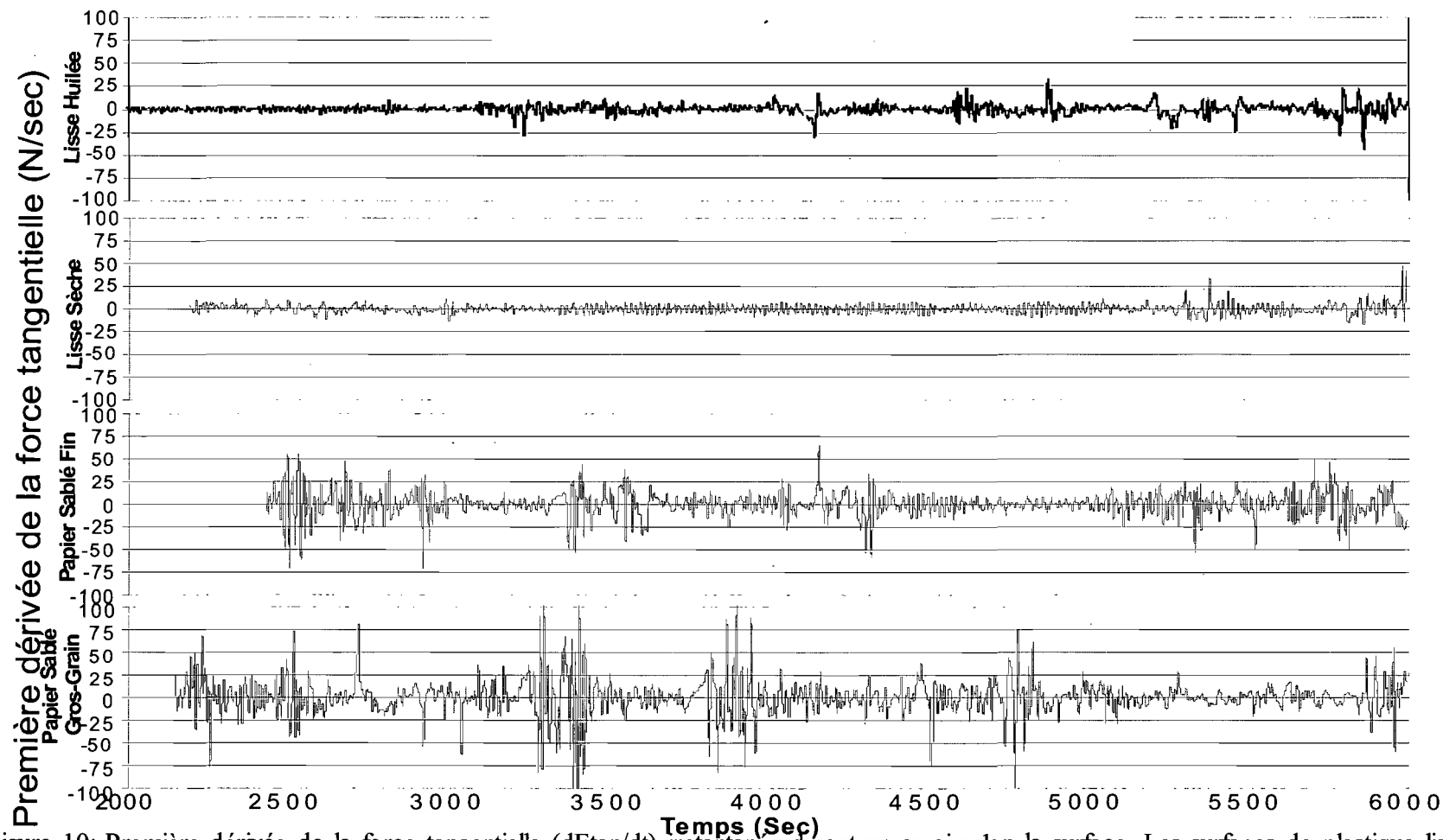


Figure 10: Première dérivée de la force tangentielle ( $dF_{tan}/dt$ ) instantanée durant un essai selon la surface. Les surfaces de plastique lisse présentent une faible variation de la  $dF_{tan}/dt$  par rapport aux surfaces de papier sablé. Dans le cas de la surface de papier sablé à gros-grains, les variations ont une amplitude plus grande que pour les autres surfaces. La valeur efficace (RMS) est la somme des variations par rapport à la moyenne de  $dF_{tan}/dt$ .

chaque surface. Les couleurs expriment la densité d'échantillons ayant les mêmes valeurs combinées, bleu foncé pour les densités nulles et rouge foncé pour les plus fortes densités. Le coefficient de corrélation entre la force normale et la force tangentielle est de 0,65 pour la surface de plastique lisse sec, de 0,67 pour la surface de plastique lisse huilé et de 0,61 pour la surface de papier sablé à gros-grains. La surface de papier sablé fin a un coefficient de corrélation plus élevé à 0,79. Tous ces coefficients de corrélation sont significatifs (Pearson,  $p < 0,001$ ).

## 2.2 Variations de la force tangentielle

L'adhérence-glissement du doigt sur la surface peut être mesuré par les fluctuations dans la force tangentielle durant le parcours de la surface. Le taux de variation de la force tangentielle dans le temps correspond à la première dérivée de la force tangentielle. La dérivée de la force tangentielle a une moyenne aux environs de zéro et comporte des valeurs positives et négatives (Figure 10). La valeur efficace (*Root Mean Square* en anglais, RMS) est une méthode statistique permettant de mesurer la fluctuation des valeurs autour de l'axe. Plus la valeur de RMS est élevée, plus il y a de variations dans le paramètre observé. La valeur efficace de la première dérivée de la force tangentielle (RMSdFtan) de la surface de plastique lisse sec est de 5,57 ( $\pm 1,95$ ) (Tableau 3). La variation de la force tangentielle est diminuée de 20% sur la surface de plastique lisse huilé (4,55  $\pm 1,43$ ). La surface de papier sablé fin cause une plus grande valeur du RMSdFtan (7,78  $\pm 2,25$ ) soit de 35% supérieure à celui de la surface de plastique lisse sec. Le RMSdFtan est maximal sur la surface de papier sablé à gros-grains (10,33  $\pm 2,82$ ), près du double de celui constaté sur la



Tableau 3: Moyenne des valeurs efficaces de la première dérivée de la force tangentielle		
Surfaces	RMSdFtan	
Plastique lisse huilé	4,55	$\pm 1,43$
Plastique lisse sec	5,57	$\pm 1,95$
Papier sablé fin	7,78	$\pm 2,25$
Papier sablé gros-grains	10,33	$\pm 2,82$

Tableau 3: Moyenne des valeurs efficaces de la première dérivée de la force tangentielle par essai selon le type de surface et leurs écart-types.

surface de plastique lisse sec. Toutes ces valeurs sont significativement différentes (ANOVA  $p < 0,001$ , Tukey  $p < 0,001$  pour tous).

### 2.3 Coefficient de friction dynamique

Les moyennes des coefficients de friction dynamique de chaque surface ont été analysées par une ANOVA suivie d'un test de comparaison multiple de Tukey. La figure 11 montre que les coefficients de friction dynamique sont significativement différents pour chaque surface (ANOVA  $p < 0,001$ , Tukey  $p < 0,001$ ). Le coefficient de friction dynamique moyen de la surface de plastique lisse sec était de 0,63 ( $\pm 0,12$ )

et diminuait significativement à 0,53 ( $\pm 0,144$ ) lorsque la surface de plastique lisse était huilé. Les deux surfaces de papier sablé avaient des coefficients de friction dynamique moyens plus élevés soit 0,77 ( $\pm 0,146$ ) pour le

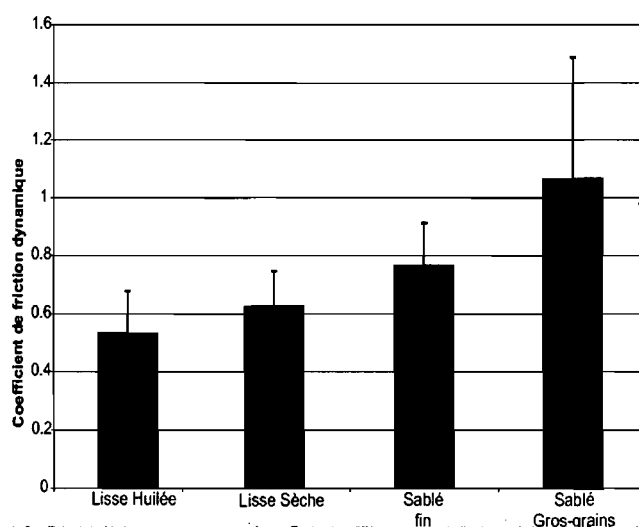


Figure 11: Coefficient de friction dynamique moyen selon les surfaces. Toutes les différences sont de l'ordre de 20% et significatives ( $p < 0,001$ ) (Tukey).

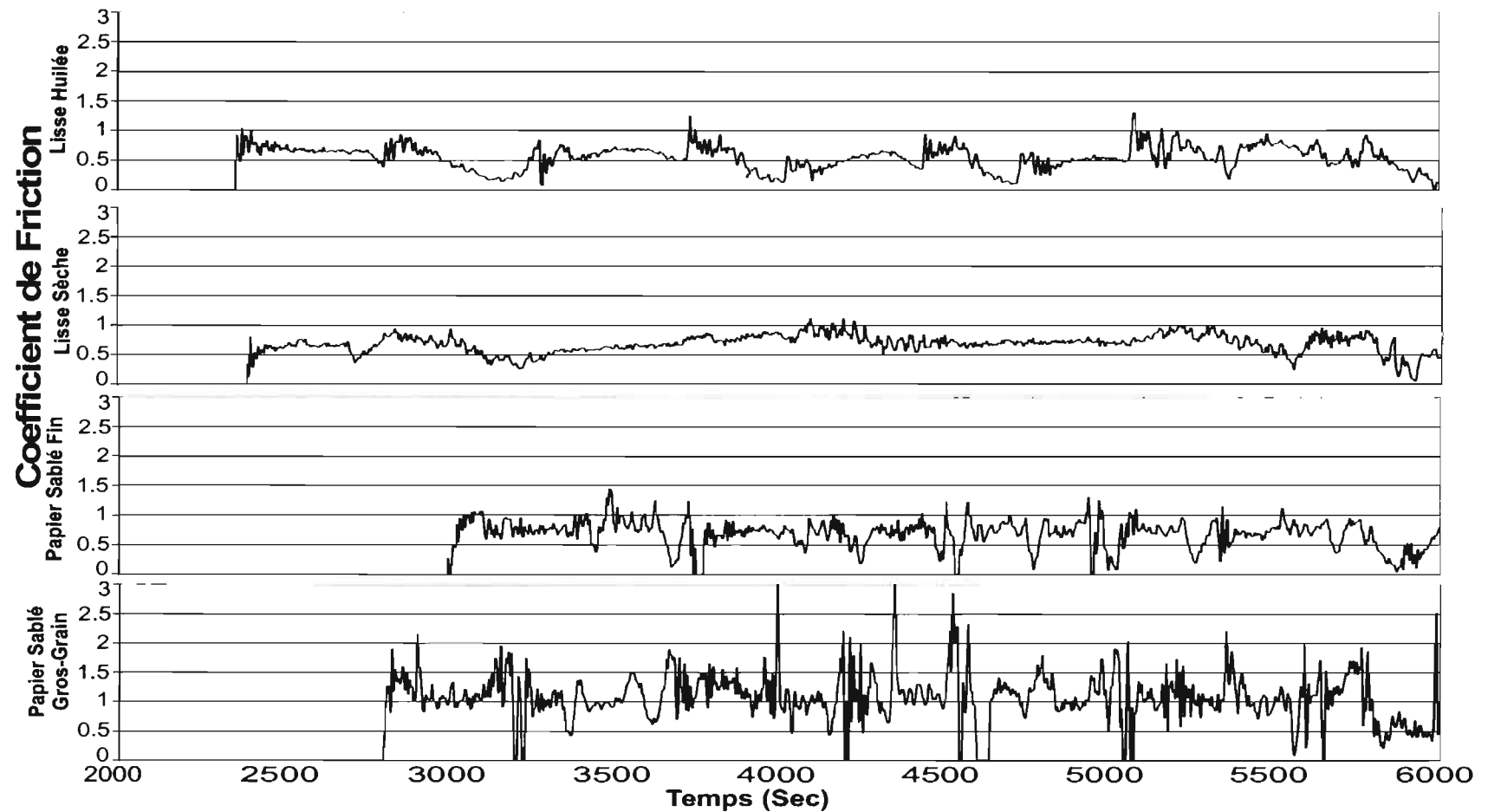


Figure 12: Coefficient de friction instantané durant un essai selon la surface. Les surfaces de plastique lisse présentent une faible variation du coefficient de friction par rapport aux deux surfaces de papier sablé. Dans le cas du papier sablé à gros-grains, les variations du coefficient de friction ont une amplitude deux fois plus grande que pour les autres surfaces.

papier sablé fin et 1,07 ( $\pm 0,42$ ) pour le papier sablé à gros-grains. La différence des coefficients de friction moyens des surfaces est donc de l'ordre de 20% entre les surfaces ordonnées selon cette propriété physique. C'est-à-dire que les surfaces sont significativement différentes tout en restant de magnitudes comparables entre elles et aux surfaces généralement rencontrées dans l'environnement naturel quant à leurs coefficients de friction respectifs.

#### **2.4 Forces et frictions comparées**

Malgré la gradation régulière des coefficients de friction dynamique des différentes surfaces, il n'y avait pas qu'une seule des deux forces, normale ou tangentielle, qui variait en fonction du coefficient de friction de toutes les surfaces. Seule la valeur efficace du taux de variation de la force tangentielle ( $RMSdF_{tan}$ ) respecte un ordre croissant de valeurs selon le coefficient de friction dynamique moyen de chacune des surfaces. Lors de l'exploration de la surface de plastique lisse huilé présentant le plus faible coefficient de friction dynamique, l'animal appliquait une force normale similaire à celle appliquée sur la surface sec. C'est alors la force tangentielle moyenne qui était diminuée proportionnellement au coefficient de friction dynamique. Dans le cas de la surface de papier sablé fin, le singe diminuait la force normale appliquée sur la surface afin de conserver une force tangentielle similaire à celle observée sur la surface lisse sec. La surface de papier sablé à gros-grains avait un coefficient de friction dynamique moyen qui a fait varier la force tangentielle à la hausse même si le singe adoptait une force normale moyenne inférieure à celle utilisée sur les trois autres surfaces.

## 2.5 Coefficient de friction non constant

La figure 12 montre un exemple du tracé du coefficient de friction pour chacune des quatre surfaces. Les variations du coefficient de friction à l'intérieur d'un essai reflètent bien les variations observées dans les distributions totales des coefficients de friction dynamique (Figure 7). Par ailleurs, le calcul du coefficient de friction dynamique inclut la force tangentielle et la fluctuation de celle-ci fait nécessairement fluctuer le coefficient de friction dynamique. Le coefficient de friction variait très peu durant les essais des deux surfaces de plastique lisse, sec et huilé, et est associé principalement aux changements de direction de l'animal. Lorsque l'animal explorait la surface de papier sablé fin, le coefficient de friction montrait de plus nombreux écarts par rapport à la moyenne. Les variations dans le coefficient de friction lors de l'exploration de la surface de papier sablé à gros-grains sont plus nombreuses et deux fois plus grandes que celles observées durant l'exploration des autres surfaces. Bien qu'une partie des variations du coefficient de friction de la surface de papier sablé à gros-grains puisse être due aux changements

**Tableau 4: Vitesses et temps de parcours moyens pour chaque type de surface**

Surfaces	Vitesse Moyenne (mm/sec)		Temps de parcours moyen (sec)	
Plastique lisse	448	± 39	1,71	± 0,84
Plastique huilé				
Plastique lisse sec	506	± 37	1,50	± 0,61
Papier sablé fin	619	± 68	1,98	± 1,03
Papier sablé gros-grains	923	± 49	1,78	± 0,81

Tableau 4 : Vitesses et temps de parcours moyens et leurs écart-types pour chaque type de surface. On rappelle que le temps de parcours est évalué sur les essais de plus d'une seconde. Ces valeurs ne sont donc que comparables entre elles.

de direction, ces variations correspondent aux fluctuations de la force tangentielle sur cette surface.

## **2.6 Temps d'exploration**

Le temps moyen de parcours des surfaces est montré dans le tableau 4. Il s'agit du temps moyen compris entre le moment où l'animal pose son doigt sur la surface et le moment où il trouve la cible. Le temps moyen de parcours de la surface de plastique lisse sec a été de 1,50 secondes ( $\pm 0,61$ ) alors que le singe prenait en moyenne 1,71 secondes ( $\pm 0,84$ ) à trouver la cible de la surface de plastique lisse huilé. La surface de papier sablé fin était la surface demandant le plus de temps d'exploration soit une moyenne de 1,98 secondes ( $\pm 1,02$ ) alors que la cible de la surface de papier sablé à gros-grains était trouvée, en moyenne, en 1,78 secondes ( $\pm 0,81$ ). Les parcours sélectionnés pour cette analyse sont ceux de plus d'une seconde. Lorsque l'analyse est étendue à tous les essais, on constate une baisse dans les temps moyens de parcours dans une proportion semblable pour toutes les surfaces (ces données ne sont pas montrées). Il n'y a pas de raison apparente au fait que la surface de plastique huilé soit explorée en un temps moyen semblable à celui nécessaire pour l'exploration de la surface de papier sablé à gros-grains.

## **2.7 La vitesse**

La vitesse moyenne d'exploration a été évaluée par surface en utilisant la moyenne des vitesses moyennes par essai et est exprimée dans le tableau 4. Les

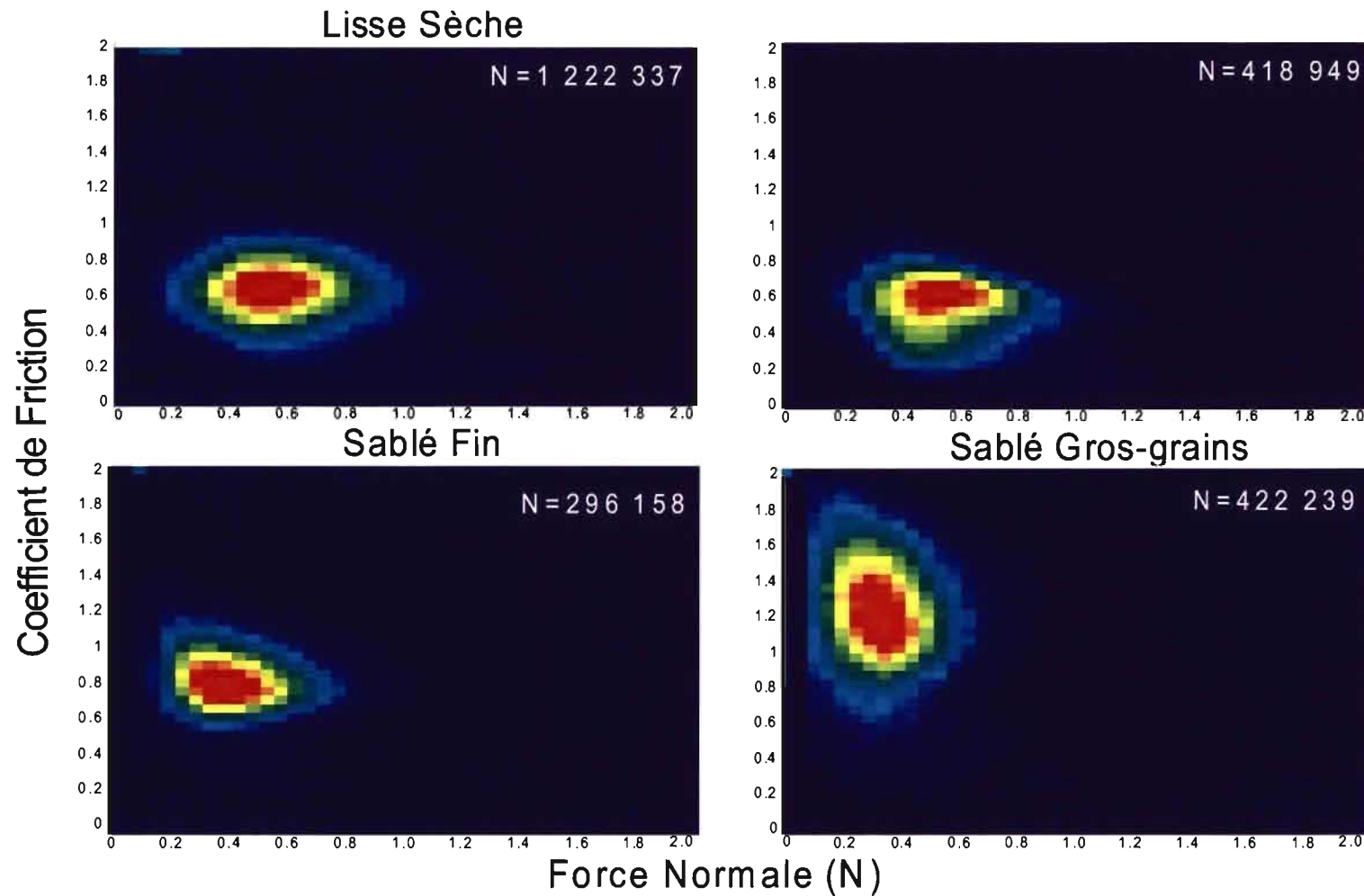


Figure 13: Diagramme de dispersion des frictions et forces instantanées durant l'exploration tactile. Le rouge reflète la plus haute densité d'échantillons à une certaine force normale et à un certain coefficient de friction et le bleu foncé reflète l'absence de ces valeurs croisées. La friction ne semble pas être influencée par la variation de la force normale ( $R < 0.15$ )

vitesse moyenne d'exploration des surfaces de plastique lisse, sec et huilé, sont significativement différentes à 506 mm/sec ( $\pm 37$ ) et 448 mm/sec ( $\pm 39$ ) respectivement (ANOVA  $p < 0,001$ , Tukey  $p < 0,001$ ). Par contre, la surface de papier sablé fin a été explorée à une vitesse moyenne de 619 mm/sec ( $\pm 68$ ), soit 25% plus rapidement que la vitesse d'exploration des deux surfaces lisses (Tukey  $p < 0,001$ ). La vitesse moyenne d'exploration sur la surface de papier sablé à gros-grains (923 mm/sec  $\pm 49$ ) est deux fois supérieure à la moyenne de vitesse de la main du singe sur la surface de plastique lisse sec (Tukey  $p < 0,001$ ). Ceci est probablement dû à la différence de stratégie d'exploration.

Ces moyennes quelque peu éloignées des valeurs instantanées ont été préférées aux valeurs brutes car les écarts-type de ces dernières sont littéralement plus grands que les moyennes. Il faut rappeler que la vitesse est la première dérivée de la position. Cette dernière est le produit d'une équation des mesures de l'appareil et est quelque peu instable à cause de la sensibilité du capteur de forces et moments de force utilisé. L'impact du bruit généré durant l'expérience se ressent encore plus sur la dérivée des valeurs calculées, donc sur la vitesse. La vitesse d'exploration ne semble pas être fortement corrélée avec la durée des essais ( $r < 0,30$ ) ou avec la force normale appliquée par le singe sur la surface ( $r < 0,40$ ).

### **3.0 LINÉARITÉ DE LA FRICTION VS FORCE NORMALE**

Certaines données recueillies chez l'humain semblent montrer que lors de la tâche de préhension, le coefficient de friction statique de la peau en contact avec l'objet saisi varie en fonction de la force normale appliquée par les doigts (Buchholz

et al. 1988). La figure 13 est un diagramme de dispersion évaluant concurremment la force normale et le coefficient de friction dynamique. La couleur exprime la fréquence d'apparition des différentes combinaisons de force et de friction, partant du bleu foncé témoignant des faibles occurrences au rouge foncé pour les valeurs les plus fréquentes. Pour les surfaces de plastique lisse sec, de plastique lisse huilé et de papier sablé fin, le coefficient de friction dynamique varie peu et il n'y a pas de grande dispersion de la force normale. Dans le cas du papier sablé à gros-grains, il semble y avoir une certaine distribution des coefficients de friction mais celle-ci n'est pas corrélée avec la distribution de la force normale ( $r = 0,02$ ). La friction dynamique est donc indépendante de la force normale dans le cadre de l'exploration tactile chez le singe. Cette indépendance pourrait être due au manque d'étendue des deux distributions.



## **Discussion**

### **1.0 STRATÉGIE D'EXPLORATION**

#### **1.1 Le singe comme modèle d'exploration tactile**

Les caractéristiques que l'on cherche à discerner d'un objet conditionnent le geste effectué pour l'exploration de l'objet (Lederman et Klatzky, 1987). Ces gestes exploratoires, ou procédures exploratoires, sont stéréotypés et présentent certaines caractéristiques qui restent invariables pour un type d'exploration. Lederman et Klatzky (1987) ont rapporté que, dans le cas de l'appréciation de texture d'un objet, la procédure d'exploration est un mouvement latéral du bout des doigts plus ou moins en rond sur la surface de l'objet. Ce comportement est répété par le singe dans notre protocole et n'a pas été appris durant le conditionnement. Dans la recherche d'une cible sur la surface, le singe appliquait un balayage de la surface avec plusieurs doigts qui s'apparente au mouvement latéral des doigts. Durant le conditionnement, il n'a pas été possible d'entraîner le singe à n'utiliser qu'un seul doigt pour explorer la surface. Naturellement, le singe utilisait le bout de ses doigts pour trouver la cible. Ce comportement est probablement optimal à la recherche d'une aspérité sur une surface comme dans le cas de la définition de la texture d'un objet (Lederman et Klatzky, 1987). En aucun cas, l'animal n'a utilisé la paume de la main durant l'exploration. L'implication unique du bout des doigts lors de l'exploration tactile montre que le singe utilise une stratégie, ou procédure, stéréotypée et commune à l'humain.

L'utilisation de plusieurs doigts pour la tâche de cette expérience atteint les limites du capteur de forces utilisé. Celui-ci mesurait la somme des forces agissant sur les trois axes (X, Y et Z), un doigt virtuel en quelque sorte, représentant le centre des forces de tous les doigts en contact avec la surface. Pour analyser de façon absolue la déformation de la peau, la surface du doigt en contact avec la surface explorée doit être déterminée. Chaque unité de surface subit une partie de la force totale qu'on peut lier au principe de pression. Dans notre protocole, une même force mesurée par le capteur peut être exercée par un doigt, une petite surface, déformée par une grande pression; ou alors, plusieurs doigts, une grande surface, subissant une petite pression et se déformant peu. Par contre, la pression sur la surface de tous les doigts n'est pas nécessairement uniforme. Aucune étude n'a évalué la différence de la force exercée sur une surface par un ou plusieurs doigts. De plus, une force de cisaillement sur le doigt ne produit pas la même déformation sur les différents doigts (Nakazawa et al. 2000). Par conséquent, la pression serait difficilement homogène sur tous les doigts. Le singe appuyait généralement sur la cible après le passage de l'index ou du majeur sur celle-ci. Nous croyons qu'il s'agit des deux doigts importants lors de l'exploration tactile et par lesquels l'animal applique la force normale sur la surface. Compte tenu du manque d'information sur le lien entre la pression et la force normale durant une tâche d'exploration de surface et de l'uniformité de la pression sur la surface des doigts, la force normale exercée par le singe doit être vue comme celle exercée durant une exploration tactile avec tous les doigts.

## **1.2 Parcours général**

Le singe a appliqué la même stratégie de parcours pour les trois surfaces moins rugueuses. Sur la surface de papier sablé à gros-grains, la stratégie n'était plus de parcourir la périphérie de la surface mais de faire un mouvement de va-et-vient passant par le centre. Bien que la différence de stratégie survienne sur la surface présentant le plus haut coefficient de friction, elle pourrait être due à la position de la cible beaucoup plus centrale sur la surface de papier sablé à gros grains. Une nouvelle surface de papier sablé à gros-grain avec une cible plus périphérique sera nécessaire pour une analyse plus valable de cette surface.

## **1.3 Forces déployées**

La force normale exercée par le singe sur la surface correspond au niveau de déformation de la peau rendant cette dernière plus sensible à une nouvelle déformation. Cette force est inférieure à 0,65 N pour toutes les surfaces. Westling et Johansson (1987) ont évalué que la plage des forces normales en dessous de 1,0 N correspond au maximum de déformation de la peau du doigt humain. Le singe n'appliquait pas une force d'une telle amplitude avec tous ses doigts. Son but n'était pas de maximiser et stabiliser la surface du doigt en contact avec la surface explorée mais de rendre le doigt sensible à la déformation de la peau que cause l'aspérité recherchée.

## 1.4 Friction

Bien que les interactions chimiques et physiques s'opposant au glissement relatif de deux surfaces soient très complexes, le coefficient de friction dynamique est communément défini comme le rapport des forces normale et tangentielle nécessaire au mouvement lorsque deux surfaces en contact se déplacent l'une par rapport à l'autre. La distribution du coefficient de friction dynamique instantané de cette expérience est plutôt de type normale. Il faut préciser que la loi d'Amonton est une simplification de l'ensemble des phénomènes physiques qu'on rassemble sous le terme *friction*. En fait, la force tangentielle résultant de la friction entre le bout des doigts et une surface varie selon  $F_{tan} = K F_{norm}^n$  où  $K$  et  $n$  sont des constantes (El-Shimi, 1977). Ceci est dû aux propriétés élastiques de la peau. La variation de la force normale exercée par le doigt modifie les propriétés de résistance au cisaillement et de viscosité de la peau. Par ailleurs, cette résistance au cisaillement dépend aussi de la direction de la force appliquée (Nakazawa et al. 2000).

Puisque la peau se déforme lorsqu'elle glisse sur une surface lisse et plate, une portion du doigt peut glisser pendant qu'une autre portion adhère à la surface. Lors du mouvement du doigt sur une surface de verre lisse, les crêtes digitales se déplacent les unes par rapport aux autres (Lévesque et Hayward, 2003) et montrent un comportement d'adhérence-glissement sur la surface. Les surfaces de papier sablé présentent des distributions plus étendues de coefficient de friction à cause de la texture de ces surfaces qui accentue le comportement d'adhérence-glissement du doigt. La valeur efficace du taux de variation de la force tangentielle ( $RMSdF_{tan}$ ) montre que la force tangentielle fluctuait pendant l'exploration. Puisque la force

tangentielle entre dans l'équation du coefficient de friction dynamique de la surface, la fluctuation de celle-là peut faire varier la distribution de celui-ci.

### **1. 5 Vitesse**

Les écarts-type des vitesses durant l'exploration sont plus grands que les moyennes des vitesses. Cette grande variabilité n'a pas été éliminée par filtre et les données extrêmes ont été largement tolérées. Ces fluctuations sont probablement dues, en partie, au phénomène d'adhérence-glissement entre les doigts et la surface d'exploration. Cette variabilité pourrait aussi être partiellement due à la sensibilité de l'appareil. La position, dont est dérivée la vitesse, est le résultat d'une formule comprenant la mesure de trois forces et deux moments de force. L'incertitude de chaque axe s'accumule lors du calcul et est amplifié dans la dérivation. Par contre, les valeurs de vitesse lors de l'exploration sont comparables à celles observées chez l'humain lors de tâches d'exploration tactile (86 mm/sec, Smith et al. 2002 b) et d'estimation de rugosité de surface (entre 20 et 100 mm/sec, Vega-Bermudez et al. 1991). Ces valeurs sont donc valables à titre comparatif mais non en tant que valeurs absolues.

## **2.0 DIFFÉRENCES ENTRE SURFACES**

### **2.1 Matériel utilisé pour les surfaces**

L'huile utilisée comme lubrifiant sur la surface de plastique lisse a efficacement diminué le coefficient de friction de la surface de plastique. Toutefois, il

s'agit d'un revêtement qui a modifié les propriétés à la fois de la surface et du doigt. Par ailleurs, même si la quantité d'huile sur la surface diminuait au cours des essais successifs, le coefficient de friction restait le même indépendamment du numéro de l'essai ou du bloc d'essais. Le choix des surfaces de papier sablé comme surfaces à haut coefficient de friction a été déterminé par le grand nombre de différentes tailles de micro-aspérités possibles et la facilité de remplacement. Bien que ces surfaces aient fait l'objet d'intenses observations pour prévenir toute usure auparavant (Verrillo et al. 1999), le coefficient de friction de ces surfaces ne semble pas diminuer après plus de mille essais.

## **2.2 Variation des forces**

Une précédente étude sur l'exploration tactile chez l'humain (Smith et al. 2002 b) avait conclu que l'augmentation du coefficient de friction par l'ajout de saccharose à la surface du doigt amenait le sujet à conserver une force normale constante. Il en découlait une force tangentielle supérieure. Ces résultats étaient corroborés par la stratégie utilisée lors de l'estimation de la rugosité de surfaces lisses. Dans ce cas, la force normale appliquée par le sujet sur la surface restait constante alors que la force tangentielle variait en fonction du coefficient de friction (Smith et Scott, 1996). Les résultats obtenus chez le singe avec la surface de papier sablé fin semblent indiquer la situation contraire durant l'exploration tactile. Lorsque les valeurs des forces de l'exploration sur cette surface sont comparées à celles exercées sur la surface de plastique lisse sec, la force normale moyenne varie de 22% alors que la force tangentielle ne varie pratiquement pas (1,1%). Toutefois, la réduction de la force normale sur la surface pourrait être expliquée de plusieurs

façons. D'abord, la taille de la cible était plus grande sur la surface de papier sablé fin que sur la surface de plastique lisse sec. La cible serait donc plus facilement perceptible et l'animal n'aurait pas besoin d'exercer une aussi grande force normale que lorsque la cible est plus petite. Cette notion de facilité n'est toutefois pas appuyée par le temps d'exploration qui aurait dû être plus court si la tâche avait été plus facile. Le temps d'exploration de la surface de papier fin était en fait le plus long de toutes les surfaces. La seconde explication possible provient de la nature même du papier sablé, sa propriété abrasive, qui aurait pu abîmer la peau et causer un certain inconfort à l'animal. La surface de papier sablé fin étant irritante pour la peau de ses doigts, le singe aurait allégé sa force normale pour éviter de se blesser. Toutefois, l'animal n'a pas montré de réticence ou de difficulté de performance à la tâche d'exploration sur la surface de papier sablé fin et aucune lésion n'a été constatée. Nous croyons que ces explications peuvent être rejetées à cause de la grande proximité des forces tangentielles observées sur ces deux surfaces. Au travers de toutes les données recueillies, il s'agit de la plus faible variation de paramètre entre deux surfaces (1,1%) et la seule à ne pas être significative ( $p > 0,6$ ). L'hypothèse que la force normale a été modifiée par un facteur extérieur et que son interaction avec le coefficient de friction de la surface ait causé, par simple hasard, une force tangentielle constante entre les deux surfaces est difficilement envisageable. L'hypothèse reformulée du comportement de l'exploration tactile serait donc que l'animal varie la force normale exercée sur la surface en fonction du coefficient de friction de celle-ci pour conserver une force tangentielle constante. Cette constance de la force tangentielle semble aller à l'encontre de la stratégie utilisée lors de l'estimation de la rugosité de surfaces

lisses. Dans les deux cas, la force tangentielle est l'élément discriminatif durant la tâche, entre plusieurs surfaces ou sur une même surface. Par contre, ces deux tâches sont fonctionnellement différentes : l'estimation de la rugosité demande la comparaison de la résistance au glissement de la surface parcourue tandis que la recherche d'une aspérité est l'optimisation de la sensibilité du doigt à une variation ectopique de la force tangentielle.

### **2.3 Saccharose et huile**

Les conclusions sur l'impact du saccharose sur les forces durant l'exploration tactile chez l'humain concordent avec les données obtenues avec la surface de plastique huilé. Dans les deux cas, la force normale restait constante et la force tangentielle variait en fonction de la pellicule appliquée sur le doigt, plus basse avec l'huile et plus haute avec le saccharose. Bien que l'huile ait été étendue sur la surface, elle se collait aux doigts du singe et modifiait les propriétés physiques de la peau, de la surface et de la cible. Dans l'expérience chez l'humain, le doigt était directement trempé dans une solution aqueuse de saccharose. Ces deux conditions peuvent être perçues comme des modifications des propriétés physiques du doigt plutôt que d'être évaluées en terme de coefficient de friction. La force tangentielle étant le résultat de la force normale du doigt et du coefficient de friction de la surface, l'enrobage du doigt rend difficile son contrôle. Dans ces conditions, la force normale est gardée constante puisqu'elle se contrôle directement par l'action motrice du doigt sur la surface. Cette hypothèse est moins robuste que celle concernant la surface de papier



sablé fin car, bien que l'écart entre la force normale moyenne des surfaces de plastique lisse sec et lisse huilé ne soit que de 4,5%, il reste significatif ( $p < 0,001$ ).

#### **2.4 Le cas papier sablé gros-grains**

Les paramètres physiques observés durant l'exploration de la surface de papier sablé à gros-grains sont très variables et extrêmes par rapport à l'exploration sur les autres surfaces. Bien que la force normale exercée sur cette surface ait été la plus petite, la force tangentielle résultante était la plus élevée. Ses propriétés abrasives auraient pu forcer le singe à réduire sa force d'appui pour limiter la force tangentielle qui peut être vue comme un indice de la résistance entre les particules à la surface du papier de verre et la peau. Puisque la force tangentielle est supérieure à ce qui est observé sur les autres surfaces, la force normale exercée sur cette surface pourrait correspondre à la force normale minimale pour garder le contact avec la surface. D'autre part, toute hypothèse concernant cette surface devra être validée ultérieurement à cause de la différence de stratégie d'exploration du singe pour cette surface. Le mouvement de va-et-vient rapide pourrait être la source des valeurs de force observées sur cette surface. Les mouvements étaient brusques et ont pu accentuer les fluctuations de la force tangentielle mesurée par le RMSdFtan.

#### **2.5 Corrélation Ftan/Fn**

La corrélation des forces normale et tangentielle lors du mouvement du doigt sur la surface est relativement basse ( $r < 0,85$ ) pour les quatre surfaces puisqu'on

considère que la force tangentielle est une conséquence de la force normale exercée par le singe et du coefficient de friction dynamique de la surface. Il ne faut pas oublier que la force normale des portions statiques des doigts est tout à fait indépendante et peut augmenter sans que la force tangentielle réagisse de façon proportionnelle. Par ailleurs, l'adhérence-glissement mesurable par le RMSdFtan introduit une fluctuation dans la force tangentielle qui n'est pas expliquée par la force normale et diminue la corrélation entre les deux forces.

## **2.6 Friction et RMSdFtan**

Les surfaces utilisées ont montré un coefficient de friction évoluant de façon linéaire entre les surfaces tout comme le RMSdFtan. La covariance de ces valeurs ne s'explique pas par leur provenance mathématique qu'est la force tangentielle. En effet, le coefficient de friction est évalué selon l'amplitude de la force tangentielle alors que cette amplitude est éliminée par la dérivation calculée pour le RMSdFtan. La valeur efficace du taux de variation de la force tangentielle a été associée à l'estimation de la rugosité (Smith et al. 2002 a). Par contre, les aspérités des surfaces utilisées dans ce cas étaient beaucoup plus grandes que les grains de papier sablé. De plus, leur espacement sur la surface était de l'ordre du millimètre alors qu'il est pratiquement égal au diamètre des grains (0,1 et 0,2 mm) sur les surfaces de papier sablé. Puisque la taille des grains de papier sablé est proportionnelle à l'estimation de rugosité chez les sujets humains (Verrillo et al. 1999), la présente expérience montre que le RMSdFtan comme indice de rugosité peut s'étendre aux aspérités de petite amplitude. Par ailleurs, le RMSdFtan diminue durant le parcours de la surface de

plastique lisse lorsque celle-ci est huilé. Le RMSdFtan et le coefficient de friction sont indépendants l'un par rapport à l'autre mais sont tous deux calculés à partir de la force tangentielle. Les deux valeurs semblent covarier avec les échelles subjectives de rugosité des sujets humains. Le coefficient de friction dynamique est l'indice de résistance au glissement d'une surface sur le doigt alors que le RMSdFtan apporte une valeur au comportement de glissement-adhérence du doigt sur la surface.

## **2.7 Vibrations**

Un autre critère précédemment corrélé avec l'estimation de la rugosité des surfaces est la vibration occasionnée par le parcours de surfaces dotées de petites aspérités plus petites que 200  $\mu\text{m}$  (Hollins et Risner, 2000). En effet, l'addition de vibrations de haute fréquence ( $> 100\text{ Hz}$ ) à la surface lors de l'exploration diminue la capacité de discrimination des très fines structures de période spatiale de 100  $\mu\text{m}$  (Hollins et al. 2002) et augmente la sensation de rugosité pour les surfaces contenant de plus grosses aspérités d'une période spatiale de 300  $\mu\text{m}$  (Hollins et al. 2000). Hollins et Bensmaia (2007) font la distinction entre deux systèmes permettant de déterminer la rugosité des surfaces. Soit les RA et les SAI pour les macrostructures supérieures à 200  $\mu\text{m}$  et le système pacinien pour les microstructures en deçà de 200  $\mu\text{m}$ . Ce dernier permettrait d'envoyer l'information des vibrations de la peau au cortex. Le système pacinien désigné par Hollins est la portion des récepteurs sensibles aux vibrations mais n'est pas spécifiquement constitué de corpuscules de Pacini de sorte qu'une intégration de l'activité d'une population de récepteurs, par exemple la population de SAI, pourrait encoder cette vibration (Yoshioka et al. 2007). De notre

point de vue, il ne s'agit pas seulement de la réponse des corpuscules de Pacini mais de l'intégration de l'information sur les harmoniques des fréquences critiques des trois types de récepteurs, RA, SAI et PC, déjà observées pour les SAI (Gotschald et Vahle-Hinz, 1981). En fait, les récents travaux de Bensmaia et Hollins (2005) sur la densité spectrale de puissance (power spectrum) des vibrations du doigt durant le parcours de surfaces, telles que la soie ou le bois, fournissent une information non négligeable de la subtilité de la rugosité. Les aspérités de ce type de surfaces sont très petites et les vibrations générées sont composées de plusieurs fréquences différentes de plusieurs centaines de Hertz. Les surfaces utilisées durant l'exploration tactile du singe sont des textures dont la période spatiale s'apparente aux surfaces dont la rugosité dépend de la vibration. Compte tenu des limitations d'acquisition et du rapport signal sur bruit du capteur de forces et moments de force utilisé, il n'a pas été possible d'évaluer les vibrations à haute fréquence générées par le parcours du doigt du singe sur la surface. Toutefois, l'analyse des fréquences générées lors du parcours de surfaces représente la vitesse à laquelle le doigt adhère et glisse sur la surface (stick and slip). Ce taux d'adhérence glissement, jumelé avec le RMSdFtan et le coefficient de friction dynamique devrait expliquer le phénomène de rugosité et regrouper les deux types de rugosité présentés par Hollins en un continuum de rugosité. Isoler et modifier séparément chacun des paramètres demande un appareillage plus complexe mais nécessaire pour valider cette théorie.

## 2.8 Vitesse

Les vitesses recueillies au cours de l'expérience ne permettent pas d'établir de lien direct entre la vitesse et tout autre paramètre. La corrélation entre celle-ci et la force normale est faiblement positive ( $r < 0,40$  pour toutes les surfaces). Par ailleurs, la taille de la cible pourrait expliquer la variation de la vitesse moyenne entre les surfaces. Les deux surfaces de plastique avaient une cible de même dimension et une vitesse moyenne semblable. La vitesse moyenne augmentait pour les surfaces de papier sablé tout comme la taille des cibles. Par contre, ceci devrait résulter en une performance supérieure sur les surfaces de papier sablé résultant en un temps d'exploration plus court. Or, le temps d'exploration des surfaces de papier sablé est semblable (gros-grain) ou supérieur (fin) à celui des surfaces de plastique. La vitesse d'exploration est faiblement corrélée avec le temps des essais ( $r < 0,30$ ). Compte tenu du nombre de valeurs utilisées dans cette corrélation ( $n > 16\,000$ ), celle-ci est significative et témoigne d'une covariance des deux paramètres. Toutefois, cette corrélation n'est pas suffisante pour appuyer l'une ou l'autre des deux hypothèses répondant de la vitesse et du temps d'exploration, soit :

- 1- L'animal va plus vite et trouve plus rapidement la cible (corrélation positive)
- 2- L'animal va trop vite pour une raison quelconque et prend plus de temps pour trouver la cible (corrélation inverse).

Ce manque de covariance entre la vitesse moyenne d'exploration et la durée des essais laisse plutôt croire que l'animal explore à la vitesse optimale lui permettant de

trouver la cible le plus vite possible. Le temps d'exploration rend seulement compte de la difficulté de la tâche.

### **3.0 FRICTION ET FORCE NORMALE**

Plusieurs expériences montrent que le coefficient de friction de la peau en contact avec une surface varie en fonction de la force normale exercée par les doigts sur la surface (André et al. 2007; Buchholz et al. 1988; Sivamani et al. 2003). Cette variation du coefficient de friction a été constatée du point de vue statique (André et al. 2007, Buchholz et al. 1988) ou à une vitesse minimale de 5mm/min (Sivamani et al. 2003). Durant l'exploration tactile, le coefficient de friction dynamique ne varie pas en fonction de la force normale exercée sur la surface. Le coefficient de friction évalué dans la présente expérience est dynamique et non statique. De plus, la plage des forces normales exercées par l'animal sur la surface est assez étroite par rapport aux échelles de force normale sur lesquelles une différence a été précédemment rapportée.

### **4.0 EXPLORATION TACTILE ET VISUELLE**

L'exploration tactile peut se résumer en une boucle sensorimotrice, de l'acquisition d'information au niveau du cortex somatosensoriel jusqu'au mouvement conséquent provenant du cortex moteur. Un parallèle peut être tracé entre les connections impliquées dans cette boucle et celles nécessaires à l'exploration visuelle. Le colliculus supérieur serait impliqué particulièrement durant une telle

tâche (Gitelman et al. 2002) comparativement à une stimulation visuelle simple ou un mouvement de saccade (Himmelbach et al. 2007). Un surcroît d'activité d'une telle région, comprenant à la fois des afférences sensorielles et des efférences motrices, laisse croire que la même boucle pourrait se présenter durant l'exploration tactile au niveau cortical ou mésencéphalique.

## **5.0 CONCLUSIONS**

La tâche d'exploration tactile est un comportement pour lequel le singe est capable de développer une stratégie de déplacement et de déploiement des forces appliquées. Le type de surface sur laquelle est effectuée l'exploration a un impact sur la force normale appliquée par le doigt alors que l'animal tend à garder une force tangentielle constante. Lorsque les propriétés mécaniques du doigt sont perturbées par l'enrobage d'un lubrifiant, l'animal garde une force normale semblable à celle déployée sur la même surface sans enrobage. La surface de papier sablé à gros-grains devra être modifiée quant à sa cible pour vérifier la différence de stratégie de parcours et de forces utilisée par le singe. D'autres surfaces restent à être ajoutées pour fournir une échelle plus détaillée du coefficient de friction et une confirmation des hypothèses développées ici.

## **6.0 FUTUR**

Des enregistrements dans le cortex somatosensoriel primaire du singe durant l'exploration tactile permettront de mieux répertorier les stimuli auxquels les cellules des aires 1, 3a et 3b sont plus sensibles durant l'exploration tactile. Une classification

primaire pourra être faite par la différence de réponse pour le parcours des différentes surfaces et comparée aux différences de paramètres physiques mentionnés ici. Pour déterminer l'exact stimulus auquel répond la cellule, l'activité cellulaire sera comparée aux variations des paramètres durant chaque essai pour déterminer dans quelles conditions une cellule est plus active. La comparaison de l'activité du cortex sensorimoteur durant la tâche d'exploration tactile et une tâche de préhension évaluerait la différence corticale de ces deux tâches lorsque les forces en jeu sont similaires.



## Bibliographie

1. Andre, T., De Wan, M., Lefevre, P., & Thonnard, J. L. (2008). Moisture Evaluator: a direct measure of fingertip skin hydration during object manipulation. *Skin Research and Technology*.
2. Bensmaia, S. & Hollins, M. (2005). Pacinian Representations of Fine Surface Texture. *Perception & Psychophysics* **67**, 842-854.
3. Birznieks, I., Jenmalm, P., Goodwin, A. W., & Johansson, R. S. (2001). Encoding of direction of fingertip forces by human tactile afferents. *J.Neurosci.* **21**, 8222-8237.
4. Blake, D. T., Johnson, K. O., & Hsiao, S. S. (1997a). Monkey cutaneous SAI and RA responses to raised and depressed scanned patterns: effects of width, height, orientation, and a raised surround. *J.Neurophysiol.* **78**, 2503-2517.
5. Blake, D. T., Hsiao, S. S., & Johnson, K. O. (1997b). Neural coding mechanisms in tactile pattern recognition: the relative contributions of slowly and rapidly adapting mechanoreceptors to perceived roughness. *J.Neurosci.* **17**, 7480-7489.
6. Bowsher, D. (1958). Projection of the gracile and cuneate nuclei in *Macaca mulatta*: an experimental degeneration study. *J Comp Neurol.* **110**, 135-155.
7. Buchholz, B., Frederick, L. J., & Armstrong, T. J. (1988). An investigation of human palmar skin friction and the effects of materials, pinch force and moisture. *Ergonomics* **31**, 317-325.
8. Cadoret, G. & Smith, A. M. (1996). Friction, not texture, dictates grip forces used during object manipulation. *J.Neurophysiol.* **75**, 1963-1969.
9. Cauna, N. (1956). Nerve supply and nerve endings in Meissner's corpuscles. *Am.J.Anat* **29**, 315-350.
10. Chang, H. T. & Ruch, T. C. (1947). Organization of the dorsal columns of the spinal cord and their nuclei in the spider monkey. *J Anat* **81**, 140-149.

11. Connor, C. E. & Johnson, K. O. (1992). Neural coding of tactile texture: comparison of spatial and temporal mechanisms for roughness perception. *Journal of Neuroscience* **12**, 3414-3426.
12. Connor, C. E., Hsiao, S. S., Phillips, J. R., & Johnson, K. O. (1990). Tactile roughness: neural codes that account for psychophysical magnitude estimates. *Journal of Neuroscience* **10**, 3823-3836.
13. DiCarlo, J. J., Johnson, K. O., & Hsiao, S. S. (1998). Structure of receptive fields in area 3b of primary somatosensory cortex in the alert monkey. *J.Neurosci.* **18**, 2626-2645.
14. El Shimi, A. F. (1977). In vivo skin friction measurements. *J Soc Cosmet Chem* **28**, 37-51.
15. Gitelman, D. R., Parrish, T. B., Friston, K. J., & Mesulam, M. M. (2002). Functional anatomy of visual search: regional segregations within the frontal eye fields and effective connectivity of the superior colliculus. *NeuroImage* **15**, 970-982.
16. Goodwin, A. W. & Wheat, H. E. (2004). Sensory signals in neural populations underlying tactile perception and manipulation. *Annu.Rev.Neurosci.* **27**, 53-77.
17. Gottschaldt, K. M. & Vahle-Hinz, C. (1981). Merkel cell receptors: structure and transducer function. *Science* **214**, 183-186.
18. Gottschaldt, K. M., Iggo, A., & Young, D. W. (1973). Functional characteristics of mechanoreceptors in sinus hair follicles of the cat. *J.Physiol* **235**, 287-315.
19. Hamann, W. (1992). Comparative Physiology of Cutaneous Mechanoreceptors. In *Advances in comparative and Environmental Physiology*, ed. Springer-Verlag, pp. 165-183. Berlin-Heidelberg.
20. Himmelbach, M., Erb, M., & Karnath, H. O. (2007). Activation of superior colliculi in humans during visual exploration. *BMC.Neurosci* **8**, 66.
21. Hollins, M. & Bensmaia, S. J. (2007). The coding of roughness. *Can.J Exp Psychol.* **61**, 184-195.

22. Hollins, M., Bensmaia, S. J., & Roy, E. A. (2002). Vibrotaction and texture perception. *Behavioural Brain Research* **135**, 51-56.
23. Hollins, M. & Risner, S. R. (2000). Evidence for the duplex theory of tactile texture perception. *Percept.Psychophys.* **62**, 695-705.
24. Hollins, M., Fox, A., & Bishop, C. (2000). Imposed vibration influences perceived tactile smoothness. *Perception* **29**, 1455-1465.
25. Hyvarinen, J., Sakata, H., Talbot, W. H., & Mountcastle, V. B. (1968). Neuronal coding by cortical cells of the frequency of oscillating peripheral stimuli. *Science* **162**, 1130-1132.
26. Iggo, A. & Ogawa, H. (1977). Correlative physiological and morphological studies of rapidly adapting mechanoreceptors in cat's glabrous skin. *J.Physiol* **266**, 275-296.
27. Iggo, A. & Muir, A. R. (1969). The structure and function of a slowly adapting touch corpuscle in hairy skin. *J.Physiol* **200**, 763-796.
28. Johansson, R. S. & Vallbo, A. B. (1979). Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *J Physiol* **286**, 283-300.
29. Knibestol, M. (1973). Stimulus-response functions of rapidly adapting mechanoreceptors in human glabrous skin area. *J.Physiol* **232**, 427-452.
30. LaMotte, R. H. & Srinivasan, M. A. (1987a). Tactile discrimination of shape: Responses of slowly adapting mechanoreceptive afferents to a step stroked across the monkey fingerpad. *Journal of Neuroscience* **7**, 1655-1671.
31. LaMotte, R. H. & Srinivasan, M. A. (1987b). Tactile discrimination of shape: Responses of rapidly adapting mechnoreceptive afferents to a step stroked across the monkey fingerpad. *Journal of Neuroscience* **7**, 1672-1681.
32. LaMotte, R. H. & Whitehouse, J. (1986). Tactile detection of a dot on a smooth surface: peripheral neural events. *Journal of Neurophysiology* **56**, 1109-1128.

33. LaMotte, R. H. & Campbell, J. N. (1978). Comparison of responses of warm and nociceptive C-fiber afferents in monkey with human judgments of thermal pain. *Journal of Neurophysiology* **41**, 509-528.
34. Lederman, S. J. & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology* **19**, 342-368.
35. Levesque, V. & Hayward, V. (2003). Experimental Evidence of Lateral Skin Strain During Tactile Exploration. *Eurohaptics*.
36. Light, A. R. & Perl, E. R. (1979). Spinal termination of functionally identified primary afferent neurons with slowly conducting myelinated fibers. *J Comp Neurol.* **186**, 133-150.
37. Meftah, e., Belingard, L., & Chapman, C. E. (2000). Relative effects of the spatial and temporal characteristics of scanned surfaces on human perception of tactile roughness using passive touch. *Exp Brain Res.* **132**, 351-361.
38. Monzee, J., Lamarre, Y., & Smith, A. M. (2003). The effects of digital anesthesia on force control using a precision grip. *J.Neurophysiol.* **89**, 672-683.
39. Mountcastle, V. B., Talbot, W. H., Darian-Smith, C., & Kornhuber, H. H. (1967). The neural basis of the sense of flutter-vibration. *Science* **155**, 597-600.
40. Nakazawa, N., Ikeura, R., & Inooka, H. (2000). Characteristics of human fingertips in the shearing direction. *Biological Cybernetics* **82**, 207-214.
41. Nelson, R. J., Sur, M., Felleman, D. J., & Kaas, J. H. (1980). The representation of the body surface in postcentral somatosensory cortex of macaca fascicularis. *Journal of Comparative Neurology* **192**, 611-644.
42. Pare, M., Smith, A. M., & Rice, F. L. (2002a). Distribution and terminal arborizations of cutaneous mechanoreceptors in the glabrous finger pads of the monkey. *J.Comp Neurol.* **445**, 347-359.
43. Pare, M., Heather, C., & Allan, M. S. (2002b). Magnitude estimation of tangential force applied to the fingerpad. *Experimental Brain Research* **V142**, 342-348.

44. Phillips, C. G., Powell, T. P. S., & Wiesendanger, M. (1971). Projection from low-threshold muscle afferents of hand and forearm to area 3a of baboon's cortex. *The Journal of Physiology Online* **217**, 419-446.
45. Phillips, J. R., Johnson, K. O., & Hsiao, S. S. (1988). Spatial pattern representation and transformation in monkey somatosensory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **85**, 1317.
46. Poggio, G. F. & Mountcastle, V. B. (1960). A study of the functional contributions of the lemniscal and spinothalamic systems to somatic sensibility. *Bull. of the Johns Hopkins Hospital* **106**, 266-316.
47. Pubols, B. H., Jr., Welker, W. I., & Johnson, J. I., Jr. (1965). SOMATIC SENSORY REPRESENTATION OF FORELIMB IN DORSAL ROOT FIBERS OF RACCOON, COATIMUNDI, AND CAT. *Journal of Neurophysiology* **28**, 312-341.
48. Robles-De-La-Torre, G. & Hayward, V. (2001). Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch. *Nature* **412**, 445-448.
49. Salimi, I., Brochier, T., & Smith, A. M. (1999a). Neuronal activity in somatosensory cortex of monkeys using a precision grip. I. Receptive fields and discharge patterns. *J. Neurophysiol.* **81**, 825-834.
50. Salimi, I., Brochier, T., & Smith, A. M. (1999b). Neuronal activity in somatosensory cortex of monkeys using a precision grip. II. Responses To object texture and weights. *J. Neurophysiol.* **81**, 835-844.
51. Salimi, I., Brochier, T., & Smith, A. M. (1999c). Neuronal activity in somatosensory cortex of monkeys using a precision grip. III. Responses to altered friction perturbations. *J. Neurophysiol.* **81**, 845-857.
52. Shriver, J. E., Stein, B. M., & Carpenter, M. B. (1968). Central projections of spinal dorsal roots in the monkey. I Cervical and upper thoracic dorsal roots. *Am. J. Anat.* **123**, 27-74.
53. Sivamani, R. K., Goodman, J., Gitis, N. V., & Maibach, H. I. (2003). Friction coefficient of skin in real-time. *Skin Research and Technology* **9**, 235-239.

54. Smith, A. M., Chapman, C. E., Deslandes, M., Langlais, J. S., & Thibodeau, M. P. (2002a). Role of friction and tangential force variation in the subjective scaling of tactile roughness. *Experimental Brain Research* **144**, 211-223.
55. Smith, A. M., Gosselin, G., & Houde, B. (2002b). Deployment of fingertip forces in tactile exploration. *Experimental Brain Research* **147**, 209-218.
56. Smith, A. M. & Scott, S. H. (1996). The subjective scaling of smooth surface friction. *J.Neurophysiol.* **75**, 1957-1962.
57. Srinivasan, M. A., Whitehouse, J. M., & LaMotte, R. H. (1990). Tactile detection of slip: surface microgeometry and peripheral neural codes. *Journal of Neurophysiology* **63**, 1323-1332.
58. Sur, M., Merzenich, M. M., & Kaas, J. H. (1980). Magnification, receptive-field area, and "hypercolumn" size in areas 3b and 1 of somatosensory cortex in owl monkeys. *Journal of Neurophysiology* **44**, 295-311.
59. Uddenberg, N. (1968a). Functional organization of long, second-order afferents in the dorsal funiculus. *Exp Brain Res.* **4**, 377-382.
60. Uddenberg, N. (1968b). Differential localization in dorsal funiculus of fibres originating from different receptors. *Exp Brain Res.* **4**, 367-376.
61. Vega-Bermudez, F., Johnson, K. O., & Hsiao, S. S. (1991). Human tactile pattern recognition: active versus passive touch, velocity effects, and patterns of confusion. *Journal of Neurophysiology* **65**, 531-546.
62. Verrillo, R. T., Bolanowski, S. J., & McGlone, F. P. (1999). Subjective magnitude of tactile roughness. *Somatosens.Mot.Res.* **16**, 352-360.
63. Walker, A. E. & Weaver, T. A. (1942). The topical organization and termination of the fibers of the posterior columns in *Macaca mulatta*. *J.Comp.Neurol.* **76**, 145-158.
64. Wang, Q. & Hayward, V. (2007). In vivo biomechanics of the fingerpad skin under local tangential traction. *Journal of Biomechanics* **40**, 851-860.

65. Wannier, T. M., Maier, M. A., & Hepp-Reymond, M. C. (1991). Contrasting properties of monkey somatosensory and motor cortex neurons activated during the control of force in precision grip. *Journal of Neurophysiology* **65**, 572-589.
66. Westling, G. & Johansson, R. S. (1987). Responses in glabrous skin mechanoreceptors during precision grip in humans. *Experimental Brain Research* **66**, 128-140.
67. Wheat, H. E., Salo, L. M., & Goodwin, A. W. (2004). Human Ability to Scale and Discriminate Forces Typical of Those Occurring during Grasp and Manipulation. *Journal of Neuroscience* **24**, 3394-3401.
68. Willis, W. D. & Westlund, K. N. (1997). Neuroanatomy of the pain system and of the pathways that modulate pain. *J Clin Neurophysiol* **14**, 2-31.
69. Yoshioka, T., Bensmaia, S. J., Craig, J. C., & Hsiao, S. S. (2007). Texture perception through direct and indirect touch: an analysis of perceptual space for tactile textures in two modes of exploration. *Somatosens.Mot.Res.* **24**, 53-70.
70. Yoshioka, T., Gibb, B., Dorsch, A. K., Hsiao, S. S., & Johnson, K. O. (2001). Neural coding mechanisms underlying perceived roughness of finely textured surfaces. *J.Neurosci.* **21**, 6905-6916.